はじめに

高等学校の「地学」は，とても幅広い内容を扱う科目です。固体地球，地質，大気・海洋，惑星，天文と大まかな分野を並べただけでも，よくわかりますね。

みなさんが既に学んだ「地学基礎」は，さまざまな事実について広く知識を得て，それらと人間生活との関係について考える科目でした。「地学」では，観測事実や理論について知ることだけでなく，それらの物理学的・化学的な背景や，研究史を学ぶことも重視されます。内容の幅広さに対応して，必要となる基礎知識も多いといえます。

この「ベーシックレベル地学」は，そんな「地学」を学ぶ最初の一歩として作られた講座です。具体的には，次のような特徴があります。

- 全範囲を扱うが，細分化されているため１パートあたりの内容は少ない
- 紹介する単語は特に重要なものに絞られているため，数が少ない
- 演習で具体的な事例や計算例が多く扱われ，内容がイメージしやすい
- 地学に関連する他科目のまとめがある（第 22 講）

できるだけ無理なく学習を進められるようなつくりになっていますので，ゆっくり進めていきましょう。

なお，「地学」の学習は，次のような３ステップで進めていくことが大切です。

1. 各単元の理論や時間の流れなど，大まかな背景を理解する
2. （1. にでてきた）重要な単語を覚える
3. 1. を深めるための問題演習や，2. に含まれなかった単語の学習を進める

これらのうち，「ベーシックレベル地学」はおもに 1 と 2 に対応しています。本講座で基礎をしっかりと作り，次のステップにつなげていきましょう。

野津　太一

講座の受け方

受講対象

おもに「地学」を初めて学ぶ人
ただし，「地学基礎」を既に学んだ人

講座の構成

各 PART は「講義」「演習問題」「確認テスト」で構成されています。

- **講義**　基本的な知識や重要事項を学習します。短い動画があります。
- **演習問題**　講義の内容に関連した演習を行います。短い動画があります。
- **確認テスト**　授業で学んだ内容を復習するための問題です。

学習の流れ

- **「講義」前の予習**　基本的に不要です。
- **授業（「講義」）**　「講義」の動画で学びましょう。
- **「演習問題」前の予習**　できる範囲で，演習問題に取り組んでみましょう。
- **授業（「演習問題」）**　「演習問題」の動画で学びましょう。
- **復習**　授業で学んだ内容を，確認テストで復習しましょう。

「講義」の学び方

テキスト本文の一部が選択形式，まとめの一部が穴埋め形式になっています。授業を受けながら書き込んでいき，復習の際にはそこを中心に確認していくとよいでしょう。

「演習問題」の学び方

「講義」の内容に沿った知識の確認の問題もありますが，図やグラフの読み取りを行う問題のほか，計算や作図を行う問題も収録しました。少し時間のかかるものもありますので，理解を深めるために，自分で取り組んでみるとよいでしょう。

「確認テスト」の学び方

「確認テスト」は基本的な重要事項を確認するための問題です。できなかったところは，「講義」や「演習問題」の復習をしてから再挑戦しましょう。

< Note >

目次

前編

第1講 地震波と地球の内部構造
- PART1 近地地震の走時曲線
- PART2 アイソスタシー
- PART3 遠地地震の走時曲線
- PART4 地球内部を構成する物質

第2講 重力
- PART1 重力
- PART2 ジオイドと地球楕円体
- PART3 重力補正
- PART4 重力異常と地下構造

第3講 熱
- PART1 地殻熱流量
- PART2 地球内部の熱源

第4講 地磁気
- PART1 地磁気の三要素
- PART2 地磁気の分布
- PART3 地磁気の変化

第5講 プレートテクトニクス
- PART1 プレート境界と大地形
- PART2 プレートテクトニクスの成立
- PART3 プレートとマントルの動き

第6講 地震
- PART1 震源の分布
- PART2 震源の決定
- PART3 発震機構

第7講 火山
- PART1 造岩鉱物の性質
- PART2 マグマの発生
- PART3 マグマの性質の変化
- PART4 偏光顕微鏡による鉱物の観察

第8講 造山運動
- PART1 地殻変動の測定
- PART2 地殻変動と地形
- PART3 地殻変動と大陸地殻の形成
- PART4 付加体の形成と構造侵食
- PART5 変成作用と変成岩
- PART6 変成条件の推定

第9講 地表の変化
- PART1 風化作用
- PART2 さまざまな地形と堆積物

第10講 地質調査と地質図
- PART1 走向と傾斜
- PART2 ルートマップ
- PART3 地質断面図と地質柱状図
- PART4 地質図

第11講 地球の歴史
- PART1 放射性年代
- PART2 全球凍結
- PART3 顕生代の特徴的な環境変動
- PART4 新生代の環境変動
- PART5 ミランコビッチサイクル

後編

第12講 地球表層の熱収支
PART1 シュテファン・ボルツマンの法則
PART2 ウィーンの変位則
PART3 地球の全球熱収支と温室効果
PART4 地球の放射平衡温度

第13講 大気の構造
PART1 大気の組成
PART2 断熱変化と大気の安定性
PART3 雲と降水
PART4 フェーン現象

第14講 大気の運動
PART1 地上天気図と等圧面天気図
PART2 空気塊にはたらく力
PART3 地衡風
PART4 傾度風と地上風
PART5 局地風
PART6 季節風
PART7 熱帯低気圧と台風
PART8 偏西風波動と温帯低気圧
PART9 高気圧

第15講 海洋
PART1 海流
PART2 熱塩循環と海水の鉛直構造
PART3 波
PART4 潮汐

第16講 大気・海洋の変動
PART1 対流圏と成層圏の変動
PART2 大気による物質輸送
PART3 都市とその周辺の大気
PART4 物質循環

第17講 日本列島の今・昔
PART1 現在の日本近海の海洋環境
PART2 現在の日本列島の気象
PART3 日本列島の地質
PART4 新生代の日本列島

第18講 惑星の運動と見え方
PART1 地球の自転と公転
PART2 ケプラーの法則
PART3 天球と太陽の動き
PART4 時刻と暦
PART5 惑星の視運動

第19講 太陽系の天体
PART1 太陽の構造
PART2 太陽の表層
PART3 太陽活動の地球への影響
PART4 太陽系の惑星
PART5 太陽系のさまざまな天体

第20講 恒星
PART1 天体の等級
PART2 恒星のスペクトル型
PART3 HR図
PART4 主系列星の質量と寿命
PART5 太陽質量の恒星の一生
PART6 さまざまな恒星の一生
PART7 星団
PART8 連星

第21講 銀河と宇宙
PART1 銀河系の構造
PART2 銀河系の天体の運動
PART3 さまざまな銀河
PART4 宇宙の距離はしご
PART5 宇宙の階層構造
PART6 ハッブル・ルメートルの法則
PART7 宇宙の誕生と進化

第22講 地学のための基礎知識
PART1 地学のための数学
PART2 地学のための物理
PART3 地学のための化学
PART4 地学のための地理

第 1 講　地震波と地球の内部構造
PART1 近地地震の走時曲線

目標　近地地震の走時曲線から読み取れることがらについて説明できる。

Chapter1　近地地震の走時曲線

地球の半径が約 6400km であるのに対して，人類が掘削により到達した深さは約 12km に過ぎません。それより深い地下のようすは，どのようにして推定されているのでしょうか。

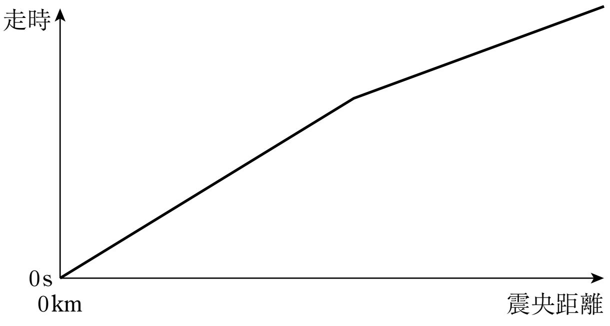
走時曲線とは

・**走時**

地震が発生してから，地震波が観測点に到達するまでに要した時間のこと。

・**走時曲線**

横軸に（走時 / 震央距離），縦軸に（走時 / 震央距離）をとり，走時と震央距離の関係を表したグラフのこと。



走時曲線の読み取り

・**走時曲線の折れ曲がり**

同じ地震波〔P 波または S 波〕でも

・地殻だけを伝わる**直接波**

・地殻とマントルを伝わる**屈折波**

では走時が異なる。

知っておこう

観測点から見て震源の比較的近い（数百 km 以内の）地震は近地地震と呼ばれています。

反対に，震源の遠い（数千 km の）地震は遠地地震と呼ばれています。

知っておこう

地震波のうち P 波と S 波では走時が異なるので，「P 波の走時」や「S 波の走時」という表現も用いられます。

復習

震源と震央（地学基礎）

震源：破壊開始点

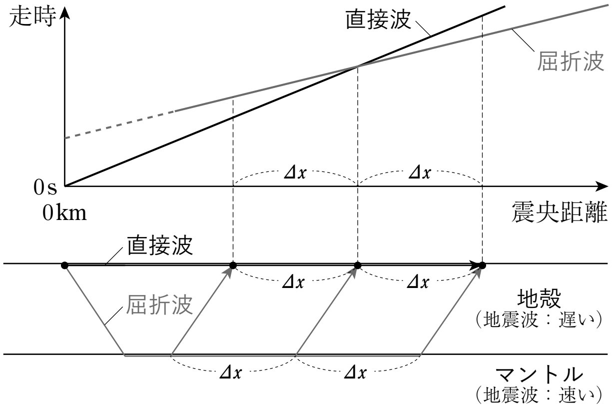
震央：震源の真上にあたる地表の地点

地殻よりマントルの方が地震波速度は（大きい / 小さい）ので，

・震央に近い地点では（直接波 / 屈折波）

・震央からある程度より遠い地点では（直接波 / 屈折波）

が先に伝わり，これによって走時曲線の折れ曲がりが生じる。



・**地震波速度**

速度は距離を時間で割ったもの〔単位時間あたりに進む距離〕

→走時曲線の（傾き / 傾きの逆数）が地震波速度を表す。

震央距離がΔxだけ大きくなったとき，

・直接波は地殻内を進む距離がΔxだけ大きくなる

・屈折波はマントル内を進む距離がΔxだけ大きくなる

ので，直接波の走時曲線からは地殻内，屈折波の走時曲線からはマントル内の地震波速度を求めることができる。

・**モホロビチッチ不連続面の深さ**

走時曲線の折れ曲がる震央距離は，地殻が厚いほど（大きい / 小さい）。このことを用いると，地殻とマントルの境界面にあたる**モホロビチッチ不連続面**〔モホ面〕の深さを推定できる。

まとめ

・走時曲線は横軸に＿＿＿＿＿，縦軸に＿＿＿＿＿をとったグラフであり，その＿＿＿＿＿が地震波速度である。

・地殻とマントルの境界面を＿＿＿＿＿＿＿＿＿という。走時曲線の折れ曲がる震央距離が大きいほど，この面の深さは＿＿＿＿と推定できる。

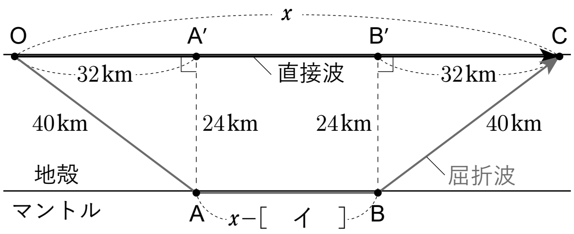
知っておこう

1909 年に発生した地震の研究を行ったクロアチアのモホロビチッチ (Andrija Mohorovičić) は，走時曲線をもとに，地下約 50km を境界面として地震波速度が急激に大きくなることを明らかにしました。この境界面が，現在モホロビチッチ不連続面と呼ばれている面です。モホロビチッチ不連続面の「不連続」は，地震波速度が不連続的に変化することに由来しているのです。

Chapter2　演習問題

ここでは，走時曲線の折れ曲がりと地殻の厚さとの関係について確認してみましょう。

問題(1)　ある地域 X では地殻の厚さが 24km で一定であり，地殻内の P 波速度は 6.4km/s，マントル内の P 波速度は 8.0km/s です。このとき，地表付近の点 O で発生した地震の P 波のうち震央距離が x の観測点 C に伝わる屈折波は，折れ線 OABC のように〔OA:AA′:A′O＝CB:BB′:B′C＝5:3:4 を満たすように〕伝わることが知られています。下の文章中の空欄［　ア　］～［　エ　］に入る数値を，単位をつけて答えましょう。



観測点 C に伝わる直接波の走時を t_1 と表すと，

$$t_1 = \frac{x}{6.4\text{km/s}}$$

である。

観測点 C に伝わる屈折波が地殻内を伝わる距離は OA と BC の長さの合計，すなわち［　ア　］である。また，マントル内を伝わる距離は AB の長さ，すなわち $x-$［　イ　］である。よって，観測点 C に伝わる屈折波の走時を t_2 と表すと，

$$t_2 = \frac{[\ \text{ア}\ ]}{6.4\text{km/s}} + \frac{x-[\ \text{イ}\ ]}{8.0\text{km/s}}$$

$$= \frac{x}{8.0\text{km/s}} + [\ \text{ウ}\ ]$$

である。

屈折波の方が直接波よりも早く到達する条件は，不等式

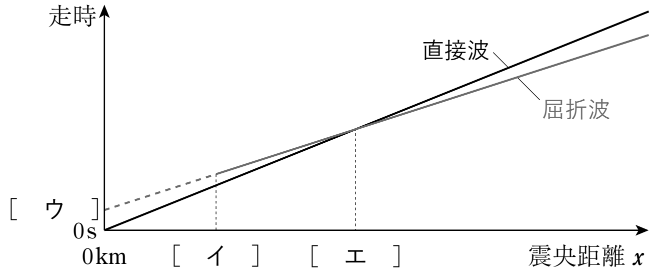
$$t_2 < t_1$$

を解いて，

$$x > [\quad エ \quad]$$

と求められる。

よって，走時曲線は次のように描かれる。



問題⑵　地域Ｙでは地域Ｘとくらべて地殻の厚さが２倍〔48km〕であり，その他の条件が地域Ｘと同じだとします。この地域Ｙについて述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選んでください。

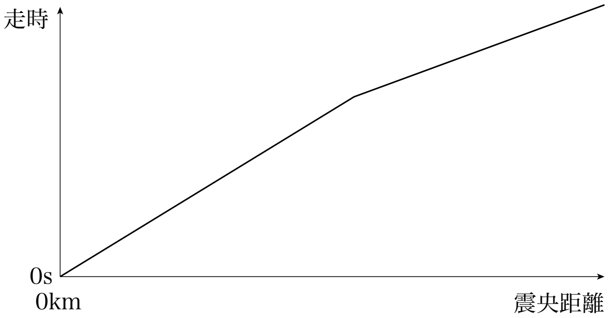
問題⑴と同じように考えると，地域Ｙでは地域Ｘとくらべて空欄［　**ア**　］の値は（2 倍 / 同じ / 半分），空欄［　**イ**　］の値は（2 倍 / 同じ / 半分）である。よって，空欄［　**ウ**　］の値は（2 倍 / 同じ / 半分）である。また，２つの地域で地震波速度は同じなので，直接波や屈折波の走時曲線の（傾き / 切片）もそれぞれ同じである。以上より，地域Ｙでは地域Ｘとくらべて空欄［　**エ**　］の値が（2 倍 / 同じ / 半分）だと考えられる。

このように考えると，地震波速度が同じであれば，走時曲線の折れ曲がる震央距離は地殻の厚さに（比例する / 反比例する）ことがわかる。

第1講　PART1　確認問題

次の文章を読み，下の問いに答えよ。

問１　下図は震源の浅い地震の走時曲線である。走時曲線とは，縦軸に a 走時，横軸に震央距離をとったグラフであり，ある震央距離のところで，b 傾きが変わり，c 折れ曲がるのが特徴である。この走時曲線から，（　ア　）不連続面の d 深さを推定することができる。



(1)　下線部ａについて，走時とは何を表しているか。最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　地震波の速度

②　地震発生から地震波到達までの時間

③　地殻の密度

④　地殻の厚さ

(2)　下線部ｂについて，グラフの傾きが表しているものは何か。最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　地震波の速度　　②　地震波の速度の逆数

③　地殻の密度　　④　地殻の厚さ

⑶　下線部 c について，グラフが折れ曲がる前の部分が表している地震波は何か。最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　直接波　　②　密度波

③　表面波　　④　屈折波

⑷　空欄アに入る語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ブーゲー　　②　ジオイド

③　フリーエア　　④　モホロビチッチ

⑸　(　ア　) 不連続面の深さが表しているものは何か。最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　地殻の密度　　②　地殻の厚さ

③　マントルの密度　　④　マントルの厚さ

⑹　下線部 d についての説明として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　折れ曲がる震央距離が小さいほど，(　ア　) 不連続面は深いと推定できる。

②　折れ曲がる震央距離が大きいほど，(　ア　) 不連続面は深いと推定できる。

③　折れ曲がった後の傾きが小さいほど，(　ア　) 不連続面は深いと推定できる。

④　折れ曲がった後の傾きが大きいほど，(　ア　) 不連続面は深いと推定できる。

PART2 アイソスタシー

目標　アイソスタシーが成立しているとはどのような状態かを説明できる。

Chapter1　岩石の性質とアイソスタシー

近地地震の走時曲線からは地殻の厚さを推定できるということを学びました。この地殻の厚さは，地形とどのような関係があるのでしょうか。

地殻と上部マントルの性質 地学基礎

・大陸地殻と海洋地殻

	表面付近のおもな岩石	およその厚さ
大陸地殻	（玄武岩 / 花こう岩）	(5～10km / 30～60km)
海洋地殻	（玄武岩 / 花こう岩）	(5～10km / 30～60km)

・上部マントル

おもに（安山岩 / かんらん岩）からなる。

・岩石の密度

SiO_2 の割合の大きな岩石ほど密度が（大きい / 小さい）傾向があり，大陸地殻，海洋地殻，上部マントルをくらべると

(密度小) ＿＿＿＿＿ < ＿＿＿＿＿ < ＿＿＿＿＿ (密度大)

の順になっている。

復習

地殻とマントル（地学基礎）
どちらも固体の岩石からなり，岩石の種類が異なっている。

復習

火成岩の分類（地学基礎）
玄武岩…苦鉄質の〔SiO_2 が少ない〕火山岩
花こう岩…ケイ長質の〔SiO_2 が多い〕深成岩
かんらん岩…超苦鉄質の〔SiO_2 がとても少ない〕深成岩

アイソスタシー

・地殻の重さとマントルの変形

マントルは基本的に固体の状態だが，長い時間で見ると流動的な性質をもつ。そのため，上に乗っている地殻や海水などの重さによって変形する。

・アイソスタシーの考え方

流動性をもつマントルの上に流動性をもたない地殻が乗っている，という状態は，水の上に木片が浮かんでいるのと同

じような状態だと考えることができる。

これは,

「重力と浮力がつり合うことによって，地殻が静止している」

といえて，この状態を**アイソスタシー**という。

地殻の重さ ＝ 地殻にはたらく浮力
＝ 地殻が押しのけたマントルの重さ

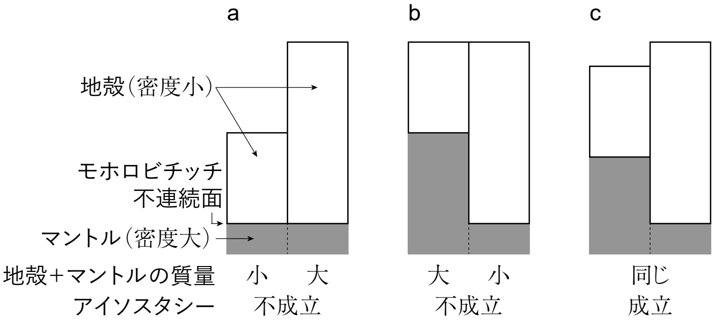
と考えると，アイソスタシーは

「マントル内の同じ深さに着目したとき，単位面積にはたらく物質の重さが場所によらず等しい」

状態だと言い換えることもできる。重さは質量と重力加速度の積なので，重力加速度が一定だと考えると，アイソスタシーは

「マントル内の同じ深さに着目したとき，単位面積の上にある物質の質量が場所によらず等しい」

という状態だといえる。



→アイソスタシーが成り立っていれば，地殻が厚いほど地表面が盛り上がり〔標高が高く〕，かつモホロビチッチ不連続面がマントル内の（深い ／ 浅い）ところに位置していると考えられる。

まとめ

・「重力と浮力がつり合うことによって，地殻が静止している」という状態のことを＿＿＿＿＿＿という。
・この状態では，マントル内の同じ深さに着目したとき，単位面積の上にある物質の＿＿＿＿は場所によらず等しい。

復習

アルキメデスの原理（地学基礎）
流体中の物体は，それが押しのけている流体の重さと等しい大きさの浮力を受ける。

知っておこう

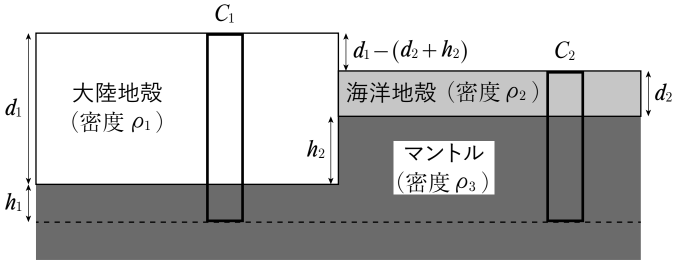
左の図の **c** は，水に氷が浮いているのと同じような状態です。**a** や **b** の状態で静止させるためには，たとえば質量が大きい側を下から持ち上げ続ける必要があります。

このように考えると，アイソスタシー (isostasy) とは，重力と浮力がつり合うことによって，ほかの力を受けなくても地殻が静止している状態だといえます。厚い地殻は，マントル内の深いところまで入り込むことにより，重力とちょうどつり合うだけの浮力を得て浮かんでいると考えることができますね！

Chapter2　演習問題

ここでは，具体的な数値を用いて，アイソスタシーについて検討してみましょう。

問題(1)　次の図のように大陸地域と海洋地域が隣り合っていて，これらの間でアイソスタシーが成り立っているとします。大陸地殻，海洋地殻，マントルの密度をそれぞれρ_1，ρ_2，ρ_3として，下の文章中の空欄［　**ア**　］～［　**カ**　］に入る式を答えましょう。式には問題文と図中にある文字を用いてください。



大陸地域と海洋地域について，図のような底面積がSの柱C_1，C_2を考える。大陸地域の柱の質量をM_1，海洋地域の柱の質量をM_2として，これらを求めよう。

まず，C_1のうち大陸地殻の部分の体積は，底面積と高さの積，すなわち［　**ア**　］である。よって，この部分の質量は［　**イ**　］と表せる。また，C_1のうち，マントルの部分についても同じように考えて，その質量は［　**ウ**　］と表せる。よって，

M_1＝［　**イ**　］＋［　**ウ**　］
　　＝［　**エ**　］

である。

C_2についても同じように式を立てると，

M_2＝［　**オ**　］

と表せる。

ここがPOINT
密度は単位体積あたりの質量なので，
（密度）×（体積）＝（質量）
です！

アイソスタシーが成り立っているとき

$$M_1 = M_2$$

であるから,

$$\rho_1 d_1 = [\quad \textbf{カ} \quad]$$

と表せる。

問題⑵ **問題⑴**の地域について,$\rho_1 = 2.7\text{g/cm}^3$,$\rho_2 = 3.0\text{g/cm}^3$,$\rho_3 = 3.3\text{g/cm}^3$ とします。また,$d_1 = 30\text{km}$,$d_2 = 5.0\text{km}$ とします。このときの h_2 は何 km か,**問題⑴**の結果をもとにして求めましょう。また,その値を海洋地殻の上面と大陸地殻の上面の高さの差〔$d_1 - (d_2 + h_2)$〕と比較して,どちらが大きいかを答えましょう。

第1講　PART2　確認問題

次の文章を読み，下の問いに答えよ。

問1　水中では，水より密度の小さい木片は浮かぶ。マントルは（　ア　）からできているが，長い時間で見ると，液体のようなゆっくりした流動性を示す。地殻はマントルより密度が小さいため，まるで水に浮かぶ木片のように，マントルに浮かんだような状態になる。これは地殻が受ける重力と浮力がつり合うためであり，このつり合いを（　イ　）という。いまの場合，浮力の大きさは地殻が押しのけたマントルの重さに等しいため，マントル内の同じ深さで考えると，単位面積の上にある物質の（　ウ　）はどこでも等しいということになる。

(1)　空欄アに当てはまる語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　花こう岩　　②　閃緑岩
③　斑れい岩　　④　かんらん岩

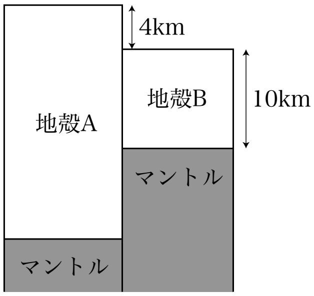
(2)　空欄イに当てはまる語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ジオイド　　②　アイソスタシー
③　アセノスフェア　　④　プルーム

(3)　空欄ウに当てはまる語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　重さ　　②　密度
③　温度　　④　重力加速度

⑷　次の図において，空欄イの状態が成り立っているものとする。地殻Aの厚さとして最も適当なものを，下の①～④のうちから一つ選べ。ただし，地殻の密度を 2.7 g/cm^3，マントルの密度を 3.3 g/cm^3 とする。



①　28km　　②　32km
③　40km　　④　48km

PART3 遠地地震の走時曲線

目標　遠地地震の走時曲線から読み取れることがらについて説明できる。

Chapter1　地震波の性質と遠地地震の走時曲線

近地地震の走時曲線からは，地殻とマントルの境界面の深さを推定することができました。それでは，遠地地震の走時曲線からは，どのようなことが推定できるのでしょうか。

地震波の性質

・P 波と S 波

	P 波	S 波
波の分類	縦波〔疎密波〕	横波〔剪断波〕
振動方向	進行方向と平行	進行方向と垂直
固体	伝わる	伝わる
液体	（伝わる / 伝わらない）	（伝わる / 伝わらない）

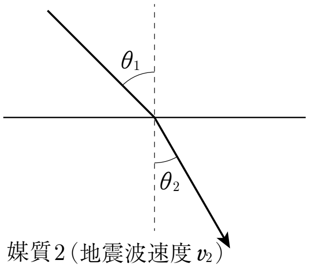
復習

P 波と S 波（地学基礎）
P 波と S 波は震源で同時に発生し，岩石中を伝わる速度は P 波の方が大きい。
　P 波が引き起こす最初のゆれを初期微動，その後に S 波が到達して生じるゆれを主要動という。

・**屈折の法則【物理】**

地震波は，媒質〔伝わる物質〕によって伝わる速度が異なる。伝わる速度が v_1 である媒質 1 から伝わる速度が v_2 である媒質 2 に入るとき，入射角 θ_1 と屈折角 θ_2 には次の関係がある。

媒質 1（地震波速度 v_1）



$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

媒質 2（地震波速度 v_2）

→地震波が

地球の中心に向かうように屈折する……（$v_1>v_2$ / $v_1<v_2$）

境界面に近づくように屈折する…………（$v_1>v_2$ / $v_1<v_2$）

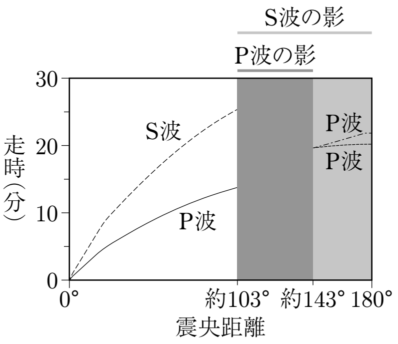
遠地地震の走時曲線

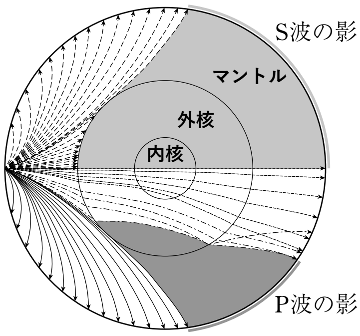
・**角距離**

遠地地震では，震央距離を地球の中心から見た角度で表す。この角度を角距離という。

・**走時曲線と地球の内部構造**

震央距離約 103° を境として，P 波と S 波の伝わらない震央距離の範囲が存在する。地震波の伝わらない範囲を**影の領域**〔P 波の影，S 波の影〕と呼ぶ。





走時曲線をもとに地震波の伝わり方を推定したものが右図である。

→たとえば，次のようなことが考えられる。

・P 波の影があることから，マントルと外核との境界では P 波が地球の中心に向かって屈折している，つまり，マントルとくらべて外核の方が P 波の速度が（大きい / 小さい）と推定される。

・S 波の影が震央距離 180° まで続いていることから，外核は S 波の伝わらない状態，つまり液体だと推定できる。

まとめ

・遠地の走時曲線には，P 波や S 波が伝わらない震央距離の範囲が存在する。このような範囲を影の領域という。

・P 波と S 波のうち，______の影は震央距離約 103° から 180° まで続いている。よって，地球の_______は，______の伝わらない_______の状態だと推定される。

知っておこう

遠地地震は震源の遠い（数千 km の）地震です。震源が遠くなると「地球がまるい」ということを無視できず，近地地震を扱ったときのように地震波が地表と平行に伝わると考えることはできなくなります。そのため，遠地地震の震央距離を地表で測った距離によって表すことにはあまり意味がなく，その代わりに角距離が用いられるのです。

知っておこう

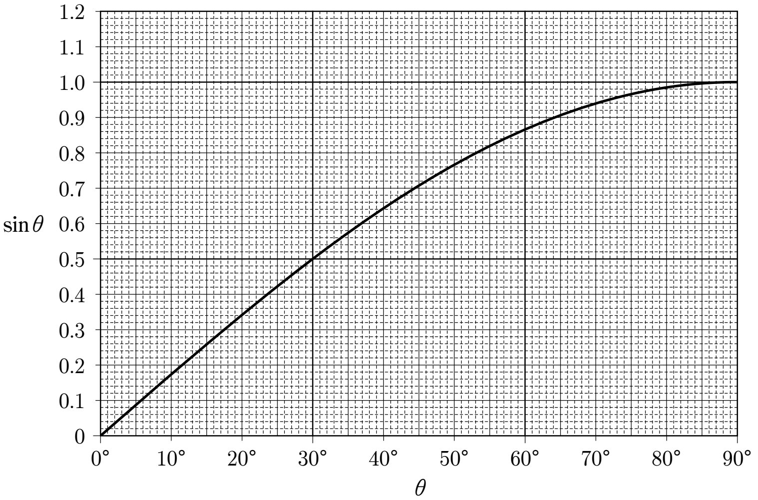
1936 年，デンマークのレーマン (Inge Lehmann) は，「地球には外核よりも地震波速度の大きな内核が存在する」という仮説を提唱しました。これは，「P 波の影」でも検出される弱い P 波に関する彼女自身の研究がもとになっています。

その後，内核が固体であるという仮説が別の研究者によって提出され，1971 年になって検証されました。

地学基礎でも学んだ「地球には内核があり，固体である」ということが明らかになるまでには，数十年にわたる研究の歴史があったのです。

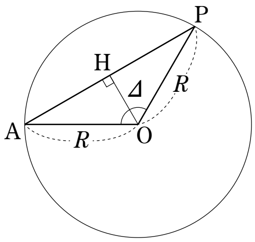
Chapter2　演習問題

ここでは，簡略化したモデルを用いて，地球の内部構造について考えてみましょう。必要であれば，三角比の値を表す次の図を用いてください。



問題⑴　半径 R の地球の地表付近を震源とする地震について，震央距離〔角距離〕が $\varDelta$ の地点に観測点があるとします。このとき，下の文章中の空欄［　**ア**　］・［　**イ**　］に入る線分と，空欄［　**ウ**　］に入る R，$\varDelta$ を用いた式を答えましょう。

地球の中心を O，震源を A，観測点を P として，O から AP に下ろした垂線と AP との交点を H とする。このとき，



AH＝PH，∠AOH＝∠POH

が成り立つ。また，直角三角形 OAH について考えて，

$$\sin\angle\mathrm{AOH}=\frac{[\ \text{ア}\ ]}{[\ \text{イ}\ ]}$$

である。OA＝R，∠AOP＝$\varDelta$ であることを用いると，

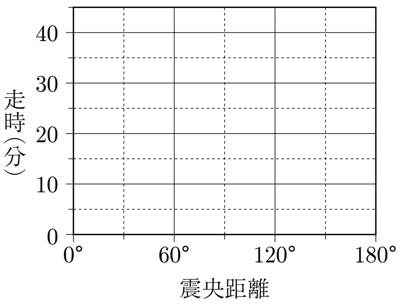
AP＝2AH

＝［　**ウ**　］

である。

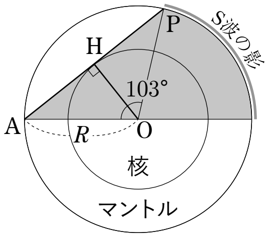
問題⑵　地球の半径を 6400km とし，地球内部のＳ波速度は 5.0km/s で一定だと仮定します。このとき，次の表の空欄に当てはまる数値を求め，Ｓ波の走時曲線を描いてください。ただし，走時は小数第１位を四捨五入して，整数で答えましょう。

震央距離⊿	走時〔分〕
0°	
60°	
120°	
180°	



ここがPOINT
計算問題では単位に注意しましょう！

問題⑶　地球の半径を 6400km とし，マントル内のＳ波速度は一定だと仮定します。Ｓ波の影が震央距離 103° ～ 180° だとすると，地球の核の半径は何 km でしょうか。次の図を参考にして計算し，上から２桁の概数で答えましょう。



ここがPOINT
マントル内のＳ波速度が一定であれば，Ｓ波はマントル内を直進します！

問題⑷　**問題⑶**で求めた核の半径について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選んでください。

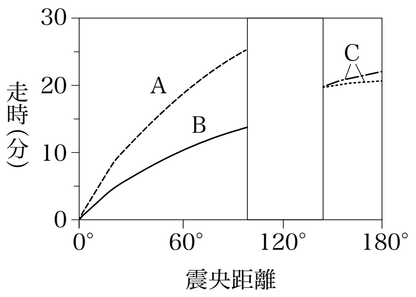
地球の核の半径は約 3500km であり，**問題⑶**で求めた半径は（大きすぎる ／ 小さすぎる）。このような違いが生じたのは，マントル内のＳ波速度が深さとともに（大きく ／ 小さく）なり，Ｓ波が曲がって伝わることを考えなかったからである。

知っておこう
問題⑵で描いた走時曲線のうち震央距離 0° ～ 103° の部分は，Chapter1 で扱った実際の走時曲線よりも直線に近い形になっています。これも，マントル内のＳ波速度が深さによって異なることを考えなかったために生じた違いです。

第1講　PART3　確認問題

次の文章を読み，下の問いに答えよ。

問1　下図は地球全体で作成した走時曲線である。このグラフは震央距離が約 103°のところから地震波が全く伝わらない領域が存在し，約 143°のところから再び地震波が観測されている。このようなグラフになるのは a P 波，S 波の物理的な波の種類や性質によって伝わり方が変化するからであり，これらのことから b 地球の内部構造や物理的性質について知ることができる。



(1)　図中の A ～ C の地震波のうち P 波はどれか。最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　A　　②　B
③　A と C　　④　B と C

(2)　下線部 a について，P 波の種類と性質として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　縦波であり，液体中でも伝わる。
②　縦波であり，液体中では伝わらない。
③　横波であり，液体中でも伝わる。
④　横波であり，液体中では伝わらない。

(3) 下線部 b について，図のように走時曲線 A，B が震央距離約 103°で途切れていることから推定できる地球内部の構造として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① 地球の中心部には液体の層（外核）が存在している。

② 地球の表層部には岩石の種類の異なる層（地殻）が存在している。

③ 地球の中心部は 2 層構造（内核と外核）となっている。

④ 地球には厚い岩石の層（マントル）が存在している。

PART4 地球内部を構成する物質

目標　地球全体，核，マントルの主要な元素組成を挙げることができる。

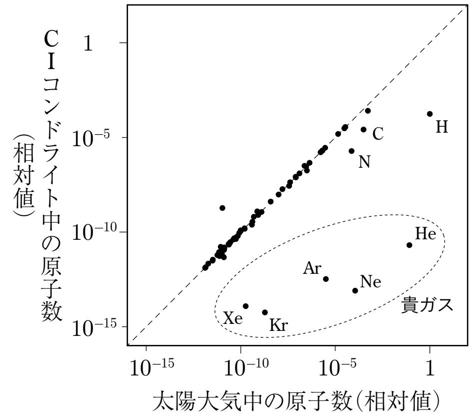
Chapter1　地球内部を構成する元素

ここまでに，地震波の伝わり方をもとにして地球の内部構造を推定できるということを学びました。地球内部を構成する元素については，どのように推定されているのでしょうか。

地球全体の元素組成

・隕石と太陽大気の元素組成

隕石のうち特定のグループのもの〔CI コンドライト〕の元素組成は，一部を除いて太陽大気の元素組成と非常によく似ている。これは太陽系のもとになった物質の元素組成をよく保存していると考えられており，地球全体の元素組成とも近い。



知っておこう

太陽大気中の原子数とくらべて CI コンドライト中の原子数が大幅に少ない元素は，揮発性元素とよばれる元素です。これらは気体の形で存在しやすい元素であり，H, C, N のほか，He や Ar などの貴ガスが含まれます。気体になってしまうので，隕石の中にはあまり残っていないんですね！

知っておこう

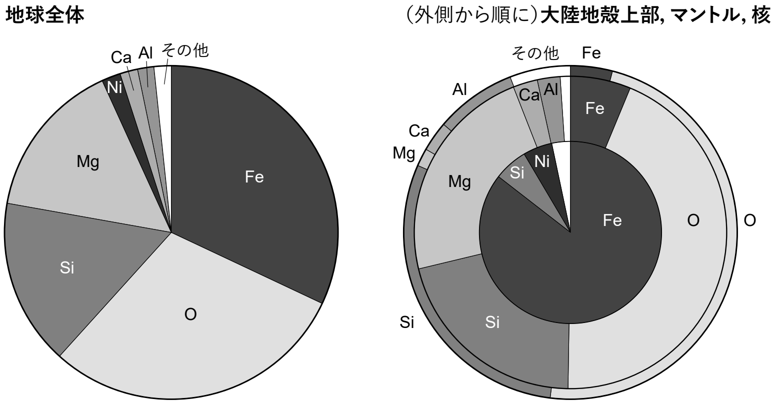
太陽大気の元素組成は，太陽の光を詳しく観測することでわかります。これについては天文分野で詳しく扱います。

・地球全体の元素組成

約 30% 含まれる……Fe，O

約 15% 含まれる……Si，Mg

約 2% 含まれる　……Ni，Ca，Al



左の図は，地球全体の元素組成を多い順に示したもの。
右の図は，地球全体で質量比の大きな7つの元素について，大陸地殻上部，マントル，核に含まれる割合（質量比）を示したもの。元素は左の図と同じ順に示している。

地球内部の層構造と元素組成

・核に多い元素

原始地球を構成する物質の大部分が融けたとき，酸素と結合しなかった金属は密度が大きいために沈降し，中心部に集まり核となった。

→ Fe や Ni は，核に多い。

・地殻やマントルに多い元素

地殻やマントルは，地球全体のうち核を作った成分を除いた残りであり，O［酸素］とさまざまな元素が結びついた成分からなる。

→地殻やマントルに最も多い元素は O であり，Si，Mg，Ca，Al も地殻やマントルに多い。特に，

・Si，（Mg / Al）は地殻に多い

・（Mg / Al）はマントルに多い

※上の図で，大陸地殻上部の「その他」には Ca より少なく Mg より多い［約 2% の］Na，K が含まれる。

まとめ

・地球全体の元素組成のうち，最も多い２つは＿＿と＿＿，次に多い２つは＿＿と＿＿である。

・核に最も多い元素は＿＿であり，マントルに最も多い元素は＿＿である。

Chapter2　演習問題

ここでは，地球を構成する元素について，単純化したモデルを用いて考えてみましょう。体積および質量の小さな地殻は無視して，地球はマントルと核から構成されているものとします。

問題⑴ 次の文章中の空欄［ **ア** ］～［ **キ** ］に入る式を答えましょう。ただし，円周率を π とします。

地球の半径を R_0，核の半径を R_1 とする。また，地球の体積を V_0，核の体積を V_1 とする。このとき，R_0，R_1 を用いて

$$V_0 = [\ \textbf{ア}\ ]$$

$$V_1 = [\ \textbf{イ}\ ]$$

と表せて，

$$\frac{V_1}{V_0} = [\ \textbf{ウ}\ ] \quad \cdots\cdots\cdots\cdots ①$$

だといえる。

さらに，地球の密度を ρ_0，核の密度を ρ_1 とする。また，地球の質量を M_0，核の質量を M_1 とする。このとき，ρ_0，ρ_1，V_0，V_1 を用いて

$$M_0 = [\ \textbf{エ}\ ]$$

$$M_1 = [\ \textbf{オ}\ ]$$

と表せて，

$$\frac{M_1}{M_0} = [\ \textbf{カ}\ ] \quad \cdots\cdots\cdots\cdots ②$$

である。

①②より，ρ_0，ρ_1，R_0，R_1 を用いて

$$\frac{M_1}{M_0} = [\ \textbf{キ}\ ]$$

と表せる。

復習

球の体積（中学数学）
半径 r の球の体積を V とすると，

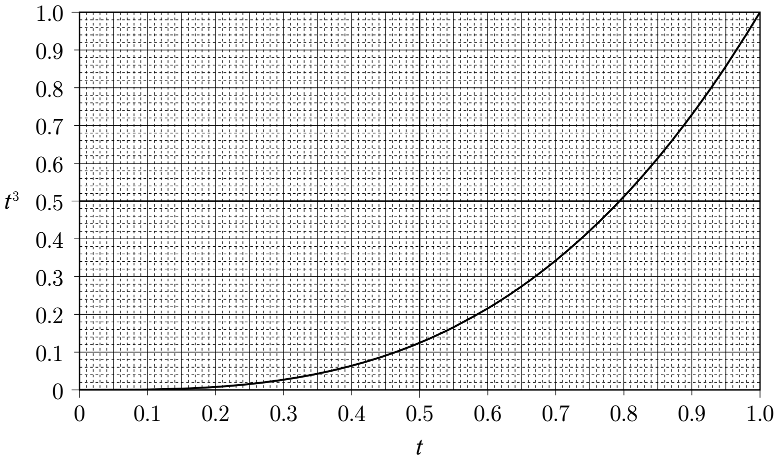
$$V = \frac{4}{3}\pi r^3$$

と表せます。

ここがPOINT

密度は単位体積あたりの質量なので，
（密度）×（体積）＝（質量）
です！

問題⑵　下の文章中の空欄［　**ク**　］・［　**ケ**　］に入る数値を上から２桁の概数で答えましょう。必要であれば，t と t^3 との関係を表した次の図を用いてもかまいません。



地球の半径を 6400km，核の半径を 3500km とする。また，地球の密度を 5.5g/cm^3，核の密度を 11g/cm^3 とする。

このとき，**問題⑴**の結果より

$$\frac{M_1}{M_0} = [\ \textbf{ク}\ ]$$

と求められるので，

$$M_1 = [\ \textbf{ク}\ ]\ M_0 \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots③$$

と表せる。

ここで，質量比で考えると，鉄は地球全体のうち 32%，マントルのうち 6.4%，核のうち x % をそれぞれ占めているとする。このとき，地球全体の鉄の質量がマントルの鉄の質量と核の鉄の質量の和であることから

$$M_0 \times \frac{32}{100} = (M_0 - M_1) \times \frac{6.4}{100} + M_1 \times \frac{x}{100} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots④$$

と表せる。③④より，

$$x = [\ \textbf{ケ}\ ]$$

と求められる。

第1講　PART4　確認問題

次の文章を読み，下の問いに答えよ。

問１　地球は層構造をしており，それぞれの層を比べると，構成している物質や岩石が異なっている。したがって，それぞれの層の元素組成も異なっている。それを推定した例の一つが，下の表である。なお，A ～ C は，それぞれ地殻，マントル，核のいずれかに相当する。このような地球内部の元素組成は，地震波の分析，岩石の高温高圧実験，（　ア　）大気の元素組成，隕石の分析などから推定されている。

元素名	地球全体	A	B	C
Mg	12.7	23.3	3.1	—
イ	—	1.8	8.1	—
ウ	15.2	21.3	25.8	—
Ca	—	2.2	6.3	—
エ	34.5	6.3	6.5	89.6
Ni	2.4	—	—	5.4
オ	29.5	44.2	45.0	—

（質量％）

(1)　空欄アに当てはまる語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　太陽　　②　金星

③　火星　　④　木星

(2)　表中の A ～ C について，それぞれどこに相当するのか。その組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　A：マントル，B：地殻，C：核

②　A：マントル，B：核，C：地殻

③　A：核，B：マントル，C：地殻

④　A：核，B：地殻，C：マントル

(3)　表中のイ～オに当てはまる元素の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　イ：Al，ウ：Si，エ：Fe，オ：O

②　イ：Si，ウ：Al，エ：O，オ：Fe

③　イ：Fe，ウ：O，エ：Al，オ：Si

④　イ：O，ウ：Fe，エ：Si，オ：Al

第 2 講　重力
PART1 重力

目標　地球の緯度と重力との関係について，そのようになる原因とともに説明できる。

Chapter1　地球の重力

地球上の物体には重力がはたらいています。この重力の大きさは，どのようにして決まっているのでしょうか。

地球の重力とは

・**地球の重力**

物体を地球に向けて引き付ける力を**重力**という。地球の重力は，万有引力と遠心力を合わせたもの〔合力〕である。

重力の大きさ W は物体の質量 m に比例し，$W = mg$ と表せる。この比例定数 g を**重力加速度**という。

・**地球と物体の間の万有引力**

すべての物体の間には，互いに引き付け合う力がはたらいている。この力を**万有引力**という。

2 つの物体の間にはたらく万有引力の大きさは 2 つの物体の質量の（和 / 積）に比例し，2 つの物体の重心間距離の 2 乗に反比例する。

地球による万有引力は，地球の重心に向かってはたらく。

覚えておこう
地球の重心は地球の中心とほぼ一致するので，万有引力は地球の中心に向かってはたらくと考えてかまいません。

・**地球の自転による遠心力**

地球上の物体は，自転軸を中心として回転運動している。回転運動している物体には，回転の中心から離れる向きに力がはたらいていると考えることができる。この力を**遠心力**という。

遠心力の大きさは回転半径〔回転軸からの距離〕に比例する。

地球の自転による遠心力は，自転軸と直交して自転軸から離れる向きにはたらく。

地球の重力の緯度分布

・回転楕円体としての地球

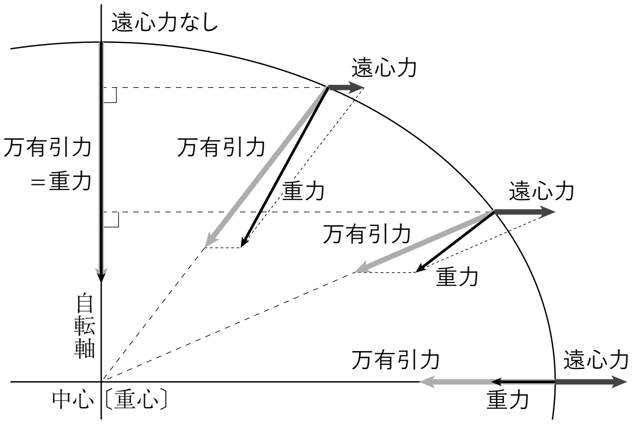
赤道から極に向かうと，

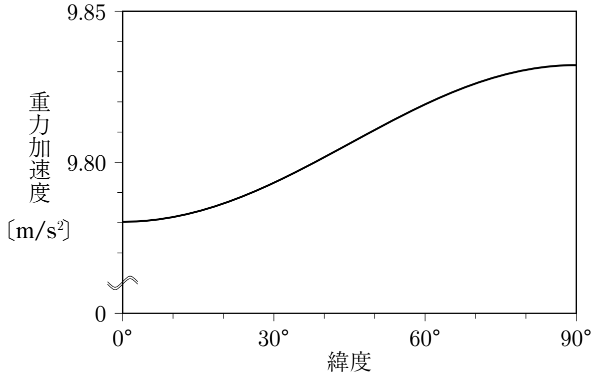
・地球の重心からの距離が減少→万有引力は大きくなる

・自転軸からの距離が減少→遠心力は小さくなる

→重力の大きさは（大きくなる / 小さくなる / 変わらない）。

実際に，重力加速度は赤道で（最大 / 最小），極で（最大 / 最小）となっている。





知っておこう

地球の重力の大きさが緯度によって異なることは，大航海時代にあたる17世紀に明らかになりました。そのきっかけは，ヨーロッパと赤道付近とで振り子時計の進み方が異なるとわかったことでした。振り子の周期は重力の大きさによって変化するため，振り子時計の進み方が異なるのは重力の大きさが異なるからだ，と考えられたのです。

覚えておこう

左の図からもわかるように，重力は地球の中心に向かってはたらくとは限らない，ということに注意しましょう。

ただし，図は遠心力の大きさを大きく誇張して描かれています。重力の大きさや向きの変化量は図に描かれているほど大きくない，ということも知っておきましょう。

まとめ

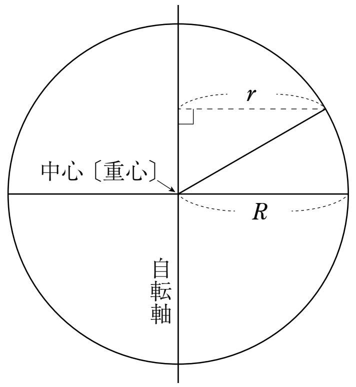
・地球の重力は，地球の重心に向かう＿＿＿＿＿＿と，自転軸から離れる向きの＿＿＿＿＿＿の合力である。

・赤道から極に向かったときの力の大きさを考えると，万有引力は＿＿＿＿＿なり，遠心力は＿＿＿＿＿なる。そのため，それらの合力である重力は＿＿＿＿＿なる。

Chapter2　演習問題

ここでは，簡単のために地球を完全な球だと仮定して，万有引力と遠心力の大きさについて考察してみましょう。

問題(1)　次の図を参考にして，万有引力と遠心力について述べた下の文章中の空欄［　**ア**　］～［　**エ**　］に入る式を答えましょう。ただし，用いる文字は G，M，R，ω のうち必要なもののみとします。



地球の半径を R，質量を M とする。

まず，地表にある質量 m の物体にはたらく万有引力の大きさ F_1 は，

$$F_1 = G\frac{Mm}{R^2}$$

と表せる（ただし，G は万有引力定数とよばれる定数）。

次に，自転軸からの距離が r のとき，質量 m の物体にはたらく遠心力の大きさ F_2 は，

$$F_2 = mr\omega^2$$

と表せる（ただし，ω は地球の自転角速度）。

赤道上の地点では $r=R$ であることから

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{[\quad ア \quad]}{[\quad イ \quad]}$$

と表せて，極では $r=$［　**ウ**　］であることから

$$\frac{F_2}{F_1} = [\quad エ \quad]$$

が成り立つ。

知っておこう

角速度とは，回転中心から物体を見た角度の単位時間あたりの変化量です。

たとえば，地球の自転角速度は 360°／日と表すことができますが，角度を弧度法（☞数学Ⅱ），時間の単位を秒として，7.3×10^{-5} rad/s〔7.3×10^{-5} ラジアン毎秒〕と表されるのが普通です。

問題⑵ $GM = 4.0 \times 10^{14} \mathrm{m^3/s^2}$，$R = 6.4 \times 10^6 \mathrm{m}$,
$\omega = 7.3 \times 10^{-5} \mathrm{rad/s}$ とします。このとき，赤道上の地点において遠心力の大きさ F_2 は万有引力の大きさ F_1 の約何倍でしょうか。**問題⑴**の結果を用いて，上から 2 桁の概数で求めましょう。

第 2 講 PART1 確認問題

次の文章を読み，下の問いに答えよ。

問 1 地球上の物体には，物体を地球に向けて引き付ける力である重力がはたらいている。地球の重力は，地球の重心に向かう（ ア ）と，自転軸から離れる向きの（ イ ）の合力である。（ ア ）は，互いに引き付け合う力で，二つの物体の質量の積に（ ウ ）し，二つの物体の重心間の距離の 2 乗に（ エ ）する。（ イ ）は，回転している物体に，回転の中心から離れる向きにはたらく力である。この力の大きさは回転半径に（ オ ）する。地球を回転楕円体として赤道から極に向かったときの力の大きさの変化を考えると，（ ア ）は（ カ ）なり，（ イ ）は（ キ ）なる。そのため，それらの合力である重力は（ ク ）なる。

(1) 空欄アに当てはまる語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① 磁力　② 遠心力
③ 万有引力　④ 摩擦力

(2) 空欄イに当てはまる語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① 磁力　② 遠心力
③ 万有引力　④ 摩擦力

(3) 空欄ウ～オに当てはまる語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① ウ：反比例，エ：反比例，オ：比例
② ウ：比例，エ：反比例，オ：比例
③ ウ：反比例，エ：比例，オ：反比例
④ ウ：比例　エ：反比例　オ：反比例

⑷　空欄カ～クに当てはまる語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　カ：大きく，キ：小さく，ク：大きく

②　カ：大きく，キ：大きく，ク：小さく

③　カ：小さく，キ：小さく，ク：大きく

④　カ：小さく，キ：大きく，ク：小さく

PART2 ジオイドと地球楕円体

目標　ジオイドと地球楕円体とは何か，互いの関係に触れて説明できる。

Chapter1　ジオイドと地球楕円体

私たちは，さまざまなところで重力の向きを利用しています。たとえば，傾いていない水平な面とは，重力の向きと垂直な面のことです。世界中の重力の向きは,何と対応しているのでしょうか。

ジオイド

・平均海水面

海水面は，波や気圧変動，潮汐などの影響でつねに変化している。それを長期的に平均したものを**平均海水面**という。平均海水面は，すべての場所で重力と垂直な，なめらかな曲面である。

知っておこう
潮汐とは，約半日や約半月を周期とする海面の上下動です。詳しくは，大気・海洋分野で扱います。

・ジオイド

地球の表面の約（3 割 ／ 7 割）は海洋だが，残りは陸地である。そこで，陸地にも水路を作って海洋とつなげることで，陸地にも仮想的な平均海水面を作る。これによってできる，地球全体を覆う仮想的な平均海水面を**ジオイド**という。

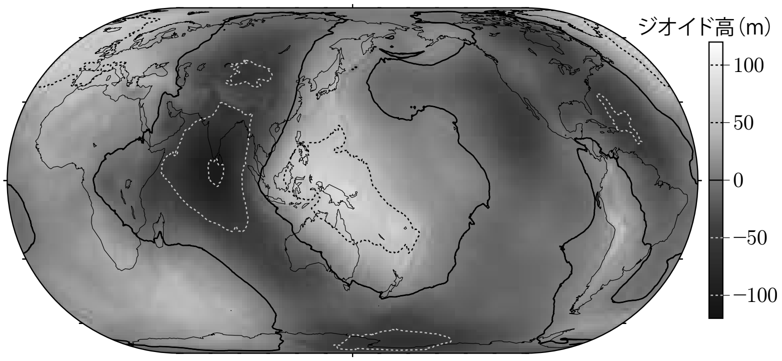
地球楕円体

・地球楕円体とは

ジオイドは，なめらかな曲面だが回転楕円体ではなく，起伏をもっている。そこで，ジオイドと最もよく合う回転楕円体を考え，これを**地球楕円体**という。

・ジオイド高

地球楕円体を基準面として，そこからジオイドまでの高さをジオイド高という。地球全体でみたとき，ジオイド高は（－100m ～ 100m ／ －10km ～ 10km）程度の範囲の値をとる。



EIGEN-6C4 (Förste et al., 2014) のデータをもとに作図

知ってこう

標高は，ジオイドを基準とした地表面の高さです。

地球上で最も標高の高い地点は標高約 8800m，最も標高の低い地点は標高約－11000m です。

まとめ

・ジオイドは，海洋の＿＿＿＿＿を陸地にも仮想的に延長して，地球全体を覆ったなめらかな曲面である。

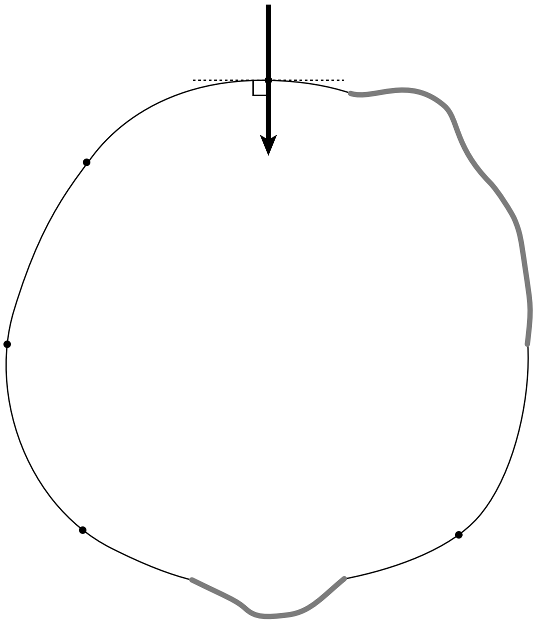
・地球楕円体は，ジオイドと最もよく合うような＿＿＿＿＿である。

Chapter2　演習問題

ここでは，重力の方向とジオイドや地球楕円体との関係について，模式的な図を用いて考察してみましょう。ただし，簡単のために地球を完全な球とみなしてよい，つまり，地球楕円体は完全な球であると考えてよいものとします。

問題⑴　次の図は，地球の断面における平均海水面と陸地の表面を模式的に示したものです。海洋地域の●で示した地点について，重力の向きを例にならって矢印で示しましょう。

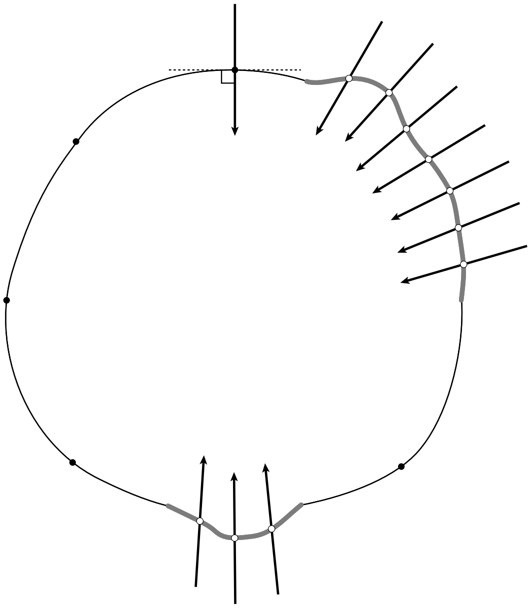
ここがPOINT
平均海水面と重力の向きは，つねに垂直です！



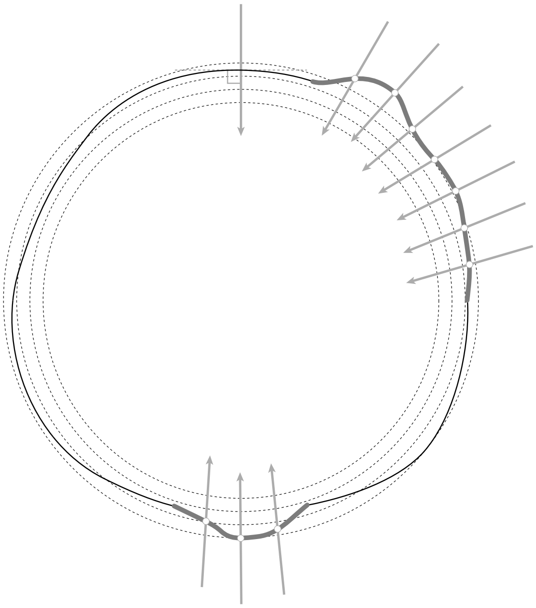
問題⑵　次の図は，陸地の○で示した地点における重力の向きを，**問題**⑴の図に描き加えたものです。平均海水面を陸地にも仮想的に延長するとどのようになるか，重力の向きに注意して曲線で描きましょう。

ここがPOINT

平均海水面と重力の向きがつねに垂直であることに注意しながら，海洋と陸地との境界から線を延ばしていきましょう！



問題⑶　平均海水面と**問題**⑵の結果をあわせたものが，ジオイドに相当します。補助線としていくつかの同心円を描いた次の図に**問題**⑵の解答を描き，同心円のうちジオイドに最も近いものを選んでください。



第 2 講　PART2　確認問題

次の文章を読み，下の問いに答えよ。

問 1　つねに変化している海水面を長期的に平均したものを平均海水面という。これは，すべての場所で（　ア　）と垂直な，なめらかな曲面である。

地球表面の約（　イ　）％は海洋であるが，陸地も存在する。そこで，陸地に水路をつくって海洋とつなげることにより，地球全体を覆う仮想的な平均海水面を考える。これを（　ウ　）という。

（　ウ　）と最もよく合う回転楕円体を（　エ　）という。（　エ　）を基準面として，そこから（　ウ　）までの高さを（　オ　）という。地球全体でみると，（　オ　）は（　カ　）程度の範囲の値をとる。

(1)　空欄アに当てはまる語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　重力　　②　遠心力
③　万有引力　　④　自転軸

(2)　空欄イに当てはまる数値として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　30　　②　50
③　70　　④　90

(3)　空欄ウ，エに当てはまる語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ウ：プレート，エ：大陸地殻
②　ウ：プレート，エ：地球楕円体
③　ウ：ジオイド，エ：大陸地殻
④　ウ：ジオイド，エ：地球楕円体

⑷　空欄オ，カに当てはまる語句と数値の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　オ：ジオイド高，カ：－ 10m ～ 10m

②　オ：ジオイド高，カ：－ 100m ～ 100m

③　オ：標高，カ：－ 10m ～ 10m

④　オ：標高，カ：－ 100m ～ 100m

PART3 重力補正

目標　重力の測定値に対する 3 つの重力補正を挙げて，それぞれの内容を簡潔に説明できる。

Chapter1　重力の測定値と重力補正

　重力の大きさは，理論的に計算されるだけではなく，実際に測定されています。その測定値は場所によって異なりますが，異なる測定点における測定値を比較するためには，測定値に対していくつかの補正を行う必要があります。どのような補正が必要なのでしょうか。

重力の測定値

・**標準重力**

　地球内部の密度分布が場所によらず均質であると仮定したとき，地球楕円体の各緯度における重力の大きさを理論的に計算できる。これを**標準重力**〔正規重力〕という。

・**重力の測定値と重力異常**

　地表の観測点や航空機，人工衛星などで重力を測定したとき，その値は標準重力と必ずしも一致しない。測定値から標準重力を引いた値を**重力異常**という。

重力補正

・**重力補正とは**

　重力の測定値を他の地域の値と比較するために，重力異常をそのまま用いることは適当でない。これは，標高や地形など，重力に影響を与える条件が測定点によって異なるからである。

　そこで，重力の測定値をその場所のジオイド〔標高 0m〕における値に補正する。このことを**重力補正**といい，おもにフリーエア補正，地形補正，ブーゲー補正が行われる。

覚えておこう

左の仮定は重要です。実際の地球では密度分布が場所によって異なるため，重力の大きさが場所によって異なるのです。

覚えておこう

重力異常 (gravity anomaly) は，重力の値が「おかしい，変だ」という意味ではありません。単に標準重力 (normal gravity) からの「ずれ」(anomaly) を表しているということに注意しましょう。

・**フリーエア補正**

測定点はふつうジオイドよりも上にある。よって，標高を 0m まで下げる補正を行う必要がある。標高が下がると，地球による万有引力は（大きく / 小さく），地球の自転による遠心力は（大きく / 小さく）なる。よって，これは重力値を（大きく / 小さく）する補正である。この補正を**フリーエア補正**といい，フリーエア補正後の重力値から標準重力を引いた値を**フリーエア異常**という。

・**地形補正**

標準重力は，地表が水平であることを仮定して算出されている。よって，測定点の周囲に山があればそれを削り，谷があればそれを埋めるような補正を行う必要がある。これらは重力値を（大きく / 小さく）する補正である。この補正を**地形補正**という。

・**ブーゲー補正**

測定点はふつうジオイドよりも上にある。標準重力はジオイドより上に物質がないと仮定しているので，ジオイドと測定点との間にある岩石を取り去る補正を行う必要がある。これは，測定点にはたらいている（上向き / 下向き）の万有引力を引き去るので，重力値を（大きく / 小さく）する補正である。この補正を**ブーゲー補正**といい，測定値にフリーエア補正，地形補正，ブーゲー補正を行った重力値から標準重力を引いた値を**ブーゲー異常**という。

知っておこう

ブーゲー補正は，18 世紀のフランスの地球物理学者ブーゲー (Pierre Bouguer) に由来しています。彼は，地球の子午線の弧の長さを測定する調査団の一員としてペルーに向かいました。そこでの重力測定において彼が発見した重力異常が，現在ではブーゲー異常と呼ばれているものです。

まとめ

・＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿は，測定点の標高がジオイドより高いとき，地球による万有引力や自転による遠心力がジオイドとは異なることの影響を補正する操作である。

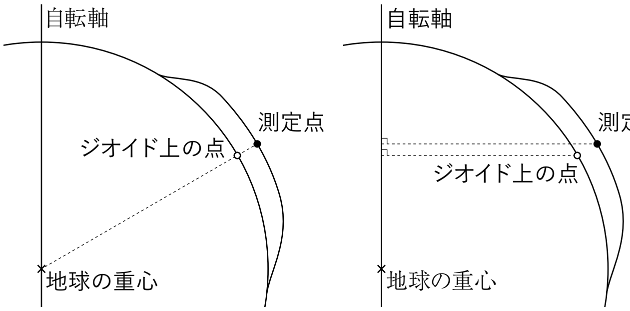
・＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿は，測定点の周囲の地形の重力への影響を補正する操作である。

・＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿は，ジオイドと測定点との間にある岩石による万有引力の影響を補正する操作である。

Chapter2　演習問題

ここでは，重力補正について，図を用いて改めて考えてみましょう。なお，重力の測定点は中緯度の陸上だとします。

問題(1)　次の図は，重力補正の操作のうちの一つを説明するための図です。この図に関連した下の文章中の(　　)について，正しいものを選びましょう。



重力補正は，重力の実測値を標高 0m，つまり測定点の真下にあるジオイド上の点における値に補正する操作である。

左の図から読み取れるように，測定点とくらべてジオイド上の点の方が地球の重心からの距離は（大きく / 小さく），地球による万有引力は（大きい / 小さい)。

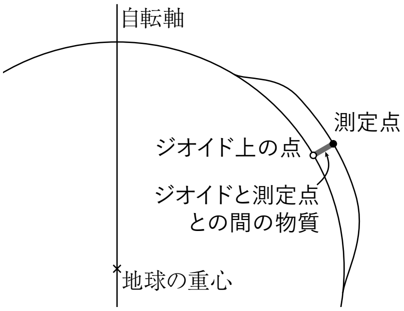
また，右の図から読み取れるように，測定点とくらべてジオイド上の点の方が地球の自転軸からの距離は（大きく / 小さく)，地球の自転による遠心力は（大きい / 小さい)。

万有引力は地球の重心向きにはたらく力，遠心力は自転軸から離れる向きにはたらく力であることに注意すると，測定点とくらべてジオイド上の点の方が重力値は（大きい / 小さい）と考えられる。この差を理論的に計算し，補正する操作が（ブーゲー補正 / フリーエア補正）である。

ここがPOINT

万有引力は２つの物体の重心間距離の２乗に反比例し，遠心力は回転半径に比例します！

問題⑵　次の図は，重力補正の操作のうちの一つを説明するための図です。この図に関連した下の文章中の(　　)について，正しいものを選びましょう。



重力補正は，重力の実測値を標高 0m，つまり測定点の真下にあるジオイド上の点における値に補正する操作である。

標準重力を算出するとき，地球の形は地球楕円体だと考えている。よって，測定値を標準重力と比較するためには，ジオイドと測定点との間に存在する物質の影響を取り除く必要がある。

ジオイドと測定点との間に存在する物質は，測定点にある物体に対して（下向き / 上向き）の（万有引力 / 遠心力）をおよぼす。そのため，これを取り除くと，重力値は（大きく / 小さく）なる。この差を理論的に計算し，補正する操作が（ブーゲー補正 / フリーエア補正）である。

ここがPOINT

問題⑴の補正について「高度を 0m に下げる」と表現されることもありますが，実際に測定点の高度を下げているわけではありません。そのため，問題⑵でも，測定点はジオイドよりも高いところにあると考えます！

第２講　PART3　確認問題

次の文章を読み，下の問いに答えよ。

問１　地球内部の密度分布が場所によらず均質であると仮定したとき，地球楕円体の各緯度における重力の大きさを理論的に計算したものを（　ア　）という。また，地表の観測点や航空機，人工衛星などで重力を測定したとき，その値は（　ア　）と必ずしも一致しない。測定値から（　ア　）を引いた値を（　イ　）という。

⑴　空欄アに当てはまる語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　万有引力　　②　重力補正
③　標準重力　　④　重力異常

⑵　空欄イに当てはまる語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ジオイド高　　②　重力異常
③　標準重力　　④　重力補正

問２ 次の各文は，三つの重力補正を説明したものである。

（　ウ　）…ジオイドと測定点との間にある岩石による万有引力の影響を補正する。

（　エ　）…測定点の周囲にある地形の重力への影響を補正する。

（　オ　）…測定点の標高がジオイドより高いとき，地球による万有引力や自転による遠心力がジオイドでの値とは異なることの影響を補正する。

(1) 空欄ウの重力補正として最も適当なものを，次の①～③のうちから一つ選べ。

① フリーエア補正　　② 地形補正

③ ブーゲー補正

(2) 空欄エの重力補正として最も適当なものを，次の①～③のうちから一つ選べ。

① フリーエア補正　　② 地形補正

③ ブーゲー補正

(3) 空欄オの重力補正として最も適当なものを，次の①～③のうちから一つ選べ。

① フリーエア補正　　② 地形補正

③ ブーゲー補正

PART4 重力異常と地下構造

目標　重力異常と地下構造との関係について，アイソスタシーや鉱床と関連付けて説明できる。

Chapter1　重力異常と地球内部の大規模な構造

重力測定は，地球内部の構造を知るための一つの方法です。地球内部の大規模な構造について，どのようなことがわかるのでしょうか。

フリーエア異常とアイソスタシー

・フリーエア異常の意味

万有引力は２つの物体の重心間距離の２乗に反比例し，２つの物体の質量の積に比例する。これらのうち（重心間距離 ／ 質量の積）を補正したときの重力異常がフリーエア異常であり，

地表面より下にある物質の質量	フリーエア異常
想定より大きい	（正 ／ 負）
想定通り	ほぼ０
想定より小さい	（正 ／ 負）

になると考えられる。

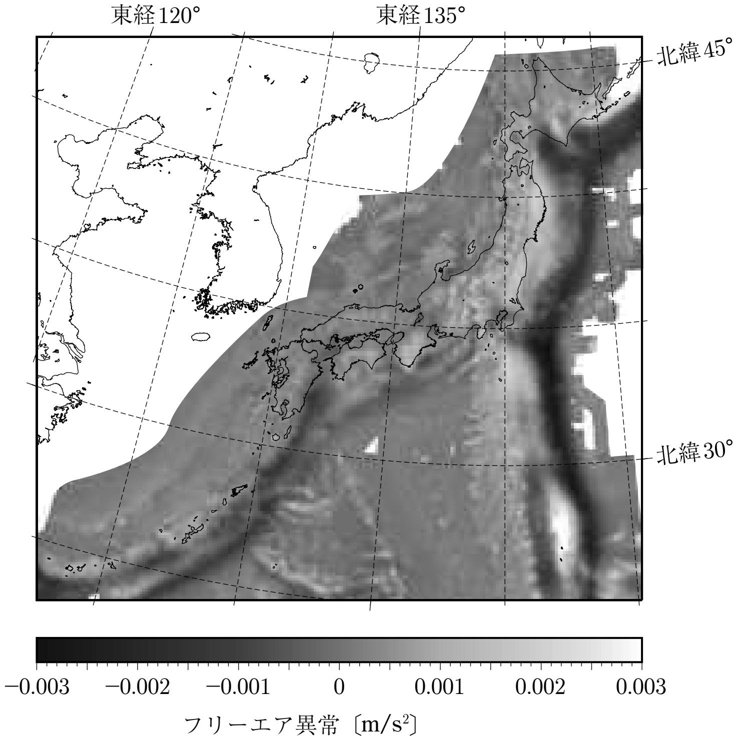
・アイソスタシーと地下の質量

アイソスタシーが成り立っているのは，「マントル内の同じ深さに着目したとき，単位面積の上にある物質の質量は場所によらず等しい」という状態である。これは，「地表の単位面積からマントル内の同じ深さまでにある物質の質量は場所によらず等しい」と言い換えることもできる。

・**フリーエア異常とアイソスタシー**

以上のことから，アイソスタシーが成り立っていれば，場所によらずフリーエア異常はほぼ０になるといえる。

実際に，プレート境界からある程度以上離れた地域では，フリーエア異常がほぼ０になっていることが多い。プレートの沈み込む境界である海溝付近では，下向きの力により地表面が（盛り上がる / 押し下げられる）ことで（正 / 負）のフリーエア異常がみられる。



重力データベース（産総研）をもとに作図

まとめ

・フリーエア異常は，地表面より下にある物質の質量が大きい場所では＿＿，少ない場所では＿＿の値をとる。
・アイソスタシーが成り立っていれば，フリーエア異常はほぼ０になる。
・プレートの沈み込む境界である＿＿＿＿付近では，下向きの力により地表面が押し下げられているため＿＿のフリーエア異常がみられる。

Chapter2　重力異常と地表付近の地下構造

重力測定を小さな空間スケールで行うことで，地表付近の小さな構造を調べることができます。どのようなことがわかるのでしょうか。

ブーゲー異常と重力探査

・ブーゲー異常の意味

ブーゲー異常は，重力の実測値にフリーエア補正，地形補正，ブーゲー補正を行った重力値から標準重力を引いた値である。

ブーゲー補正では，重力値からジオイドと測定点との間にある物質による万有引力を引き去る。この計算のとき，物質の密度は一定だと仮定する。万有引力は物質の質量に（比例 / 反比例）するので，次のようにまとめることができる。

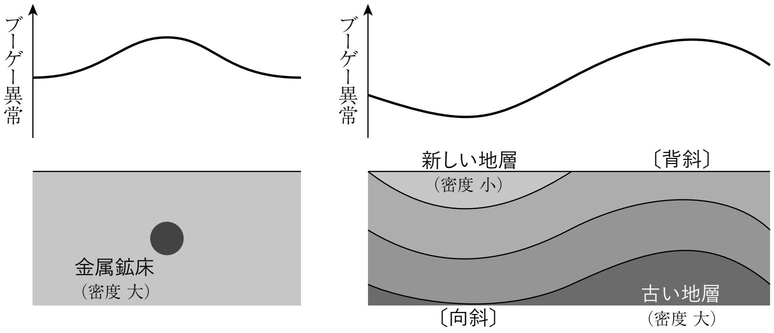
物質の密度	本来引き去るべき万有引力	ブーゲー補正の量	ブーゲー異常
想定より大	（大 / 小）	（余分 / 不足）	（大 / 小）
想定通り	中	ちょうどよい	中
想定より小	（大 / 小）	（余分 / 不足）	（大 / 小）

・重力探査

重力異常の分布をもとにして，地表付近の地下の物質の密度分布を探査することができる。これを重力探査とよぶ。

たとえば，有用な金属元素の集まった部分を金属鉱床という。金属の密度は岩石よりも（大きい / 小さい）ので，金属鉱床が地下にあれば，ブーゲー異常は（大きい / 小さい）。

また，地層が波打つように曲がった構造を褶曲（しゅうきょく）といい，そのうち波の尾根になっている部分を背斜，谷になっている部分を向斜と呼ぶ。背斜では古くて密度の大きな岩石が地表付近まで上がってきているので，ブーゲー異常が（大きい / 小さい）。



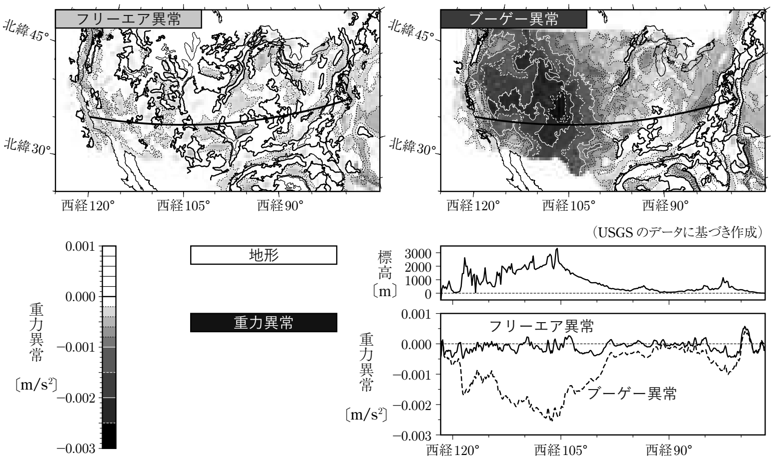
まとめ

- ブーゲー補正は，ジオイドと測定点との間にある物質の密度を，ある一定の値だと仮定して行われる。
- ブーゲー異常は，実際の物質の密度が仮定より大きい場所では＿＿＿＿，小さい場所では＿＿＿＿値をとる。
- 地層が波打つように曲がった構造を＿＿＿＿といい，そのうち＿＿＿＿ではブーゲー異常が大きい。

Chapter3　演習問題

ここでは，重力異常の実例を用いて，重力異常と地下構造との関係についての理解を深めましょう。

問題(1)　次の図は，北米における重力異常を示しています。この図に関連した下の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。ただし，下に示した地形と重力異常は，地図中の太線に沿った標高と重力異常の値です。

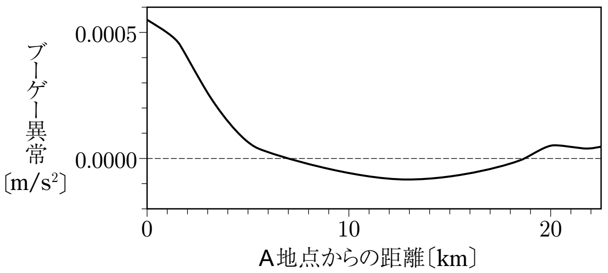


（USGSのデータに基づき作成）

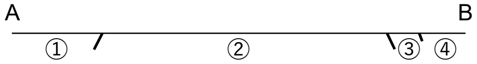
全体的に見て，フリーエア異常は０に近い値である。これは，アイソスタシーが（ほぼ成り立っている / 成り立っていない）ことを示している。

一方，ブーゲー異常はほとんどの地域で負の値をとり，特に（山脈 / 平野部）では絶対値が大きくなっている。ブーゲー異常は重力の測定値をジオイドにおける値に補正したものなので，平野部とくらべて山脈ではジオイドにおける重力が（大きい / 小さい），すなわちジオイドの下の物質の質量が（大きい / 小さい）ことが推測される。

問題⑵　次の図は，日本のある地域において，海岸の A 地点から内陸の B 地点までブーゲー異常を測定した結果を示しています。この図に関連した下の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。ただし，この地域の地表付近は堆積岩からなることが知られています。



この地域の地表付近の地層は，次の図に示すように３枚の断層によって①②③④の４つの部分に区切られている。



ブーゲー異常の分布をもとにして考えると，

①と②の境界となっている断層……（正断層 / 逆断層）

②と③の境界となっている断層……（正断層 / 逆断層）

と推定される。

また，この地域のブーゲー異常の分布が地層の褶曲とも対応しているとすると，①は（向斜 / 背斜），②は（向斜 / 背斜）の部分だと考えられる。

ここがPOINT

堆積岩の密度は，古いもの，つまり深いところにあるものほど大きい傾向があります！

復習

正断層と逆断層（地学基礎）

正断層：
断層面を上盤が滑り落ちる断層

逆断層：
断層面を上盤がのし上がる断層

第 2 講　PART4　確認問題

次の文章を読み，下の問いに答えよ。

問 1　（　ア　）は，地表面より下にある物質の質量が大きい場所では正の値，少ない場所では負の値をとる。a アイソスタシーが成り立っていれば，（　ア　）はほぼ 0 になる。プレートの沈み込む境界である海溝付近では，下向きの力がはたらいているため，（　イ　）の（　ア　）がみられる。

(1)　空欄アに当てはまる語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　地形補正　　②　フリーエア異常
③　ブーゲー補正　　④　ブーゲー異常

(2)　空欄イに当てはまる語句として最も適当なものを，次の①，②のうちから一つ選べ。

①　正　　②　負

(3)　下線部 a のアイソスタシーについての説明として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　地表からマントル内の同じ深さまでの単位面積の上にある物質の質量は , 場所によらず等しい。
②　地表からマントル内の同じ深さまでの単位面積の上にある物質の体積は , 場所によらず等しい。
③　地表から核内の異なる深さまでの単位面積の上にある物質の質量は , 場所によらず等しい。
④　地表から核内の異なる深さまでの単位面積の上にある物質の体積は , 場所によらず等しい。

問２　（　ウ　）は，ジオイドと測定点との間にある物質の密度が一定の値だと仮定して行われる。（　エ　）は，実際の物質の密度が仮定より大きい場所では（　オ　）なる。

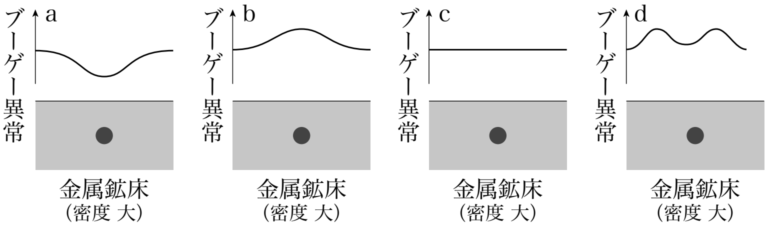
(1)　空欄ウ，エに当てはまる語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ウ：フリーエア補正，エ：フリーエア異常
②　ウ：フリーエア補正，エ：ブーゲー異常
③　ウ：ブーゲー補正，　エ：ブーゲー異常
④　ウ：ブーゲー補正，　エ：フリーエア異常

(2)　空欄オに当てはまる語句として最も適当なものを，次の①，②のうちから一つ選べ。

①　大きく　　　②　小さく

問３　地下の密度分布とブーゲー異常の関係として最も適当なものを，下の①～④のうちから一つ選べ。



①　a　　　②　b
③　c　　　④　d

第3講　熱
PART1 地殻熱流量

目標　地殻熱流量の定義や平均的な値，地理的な分布について説明できる。

Chapter1　地殻熱流量

私たちは，温泉や地熱発電という形で地球内部の熱を利用しています。地球内部から地表に伝わる熱量は，どの程度の大きさなのでしょうか。

地殻熱流量と地下増温率

・地殻を伝わる熱

地殻は固体であり，熱は地殻内を伝導により伝わっている。

→地表の温度は地殻深部より（高い / 低い）ため，地殻深部の熱が地殻を伝わり，地表から宇宙空間に放出されているといえる。

・地殻熱流量と地下増温率

地球内部から地殻を伝わり，地表の単位面積から単位時間に放出される熱量を**地殻熱流量**という。伝わる熱の大きさは単位深さあたりの温度差である**地下増温率**に比例し，その比例定数を**熱伝導率**という。すなわち，地殻熱流量を ϕ，熱伝導率を k，地下増温率を $\frac{\Delta T}{\Delta z}$ とすると，

$$\phi = k\frac{\Delta T}{\Delta z}$$

と表せる。

知っておこう

地殻熱流量に関連する単位としては，次のようなものが用いられます。

地殻熱流量
　W/m^2, mW/m^2

地下増温率
　K/km, K/100m

熱伝導率
　W/(m・K)

　なお，W は「単位時間あたりに流れる熱量〔エネルギー量〕」を表す単位であり，1W=1J/s です。

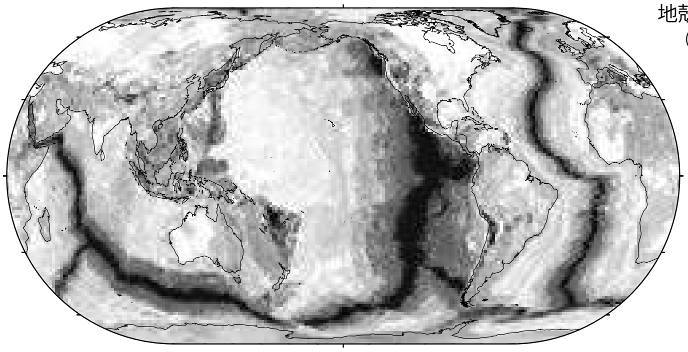
　また，温度差の単位には K の代わりに℃が用いられることもあります。さまざまな単位が用いられるので，数値を見るときは注意しましょう！

地殻熱流量の分布

・全球的な分布

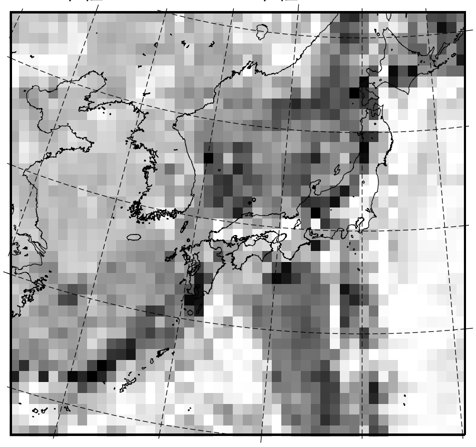
地球全体でみた地殻熱流量の平均値……約 0.08～0.09W/m^2

大陸地域と海洋地域の平均的な値を比較すると，地殻熱流量は（大陸地域 / 海洋地域）の方が大きい。特に，（海嶺 / 海溝）付近では地殻熱流量が大きい。



Lucazeau（2019）のデータをもとに作図

・**日本列島付近の分布**



Lucazeau（2019）のデータをもとに作図

→太平洋プレートが沈み込む日本海溝や伊豆・小笠原海溝付近では地殻熱流量が（大きく / 小さく），火山前線から日本海側にかけては地殻熱流量が（大きい / 小さい）。

まとめ

・地球内部から地殻を伝わり，地表の単位面積から単位時間に放出される熱量を＿＿＿＿＿＿＿という。平均的な値で比較すると，大陸地域より海洋地域の方が＿＿＿＿。また，地球全体の平均値は約 0.08 ～ 0.09W/m^2 である。

・海洋地域において，この熱量は海嶺とくらべて海溝の方が＿＿＿＿。また，日本列島において，＿＿＿＿＿から日本海側にかけてはこの熱量が大きい。

Chapter2　演習問題

ここでは，地殻熱流量の値について考察してみましょう。

問題⑴　海洋地殻における地下増温率と地殻熱流量について述べた次の文章中の空欄［　**ア**　］～［　**エ**　］に入る数値を，単位に注意して答えましょう。ただし，数値はすべて上から 2 桁の概数で求めましょう。

厚さが 6.0km で一定の海洋地殻上に，海嶺付近の A 地点と海溝付近の B 地点がある。この海洋地殻の熱伝導率は 1.5W/(m・K)，地殻の上面の温度は 0 ℃でそれぞれ一定だと考えてよいものとする。

A 地点における地下増温率が 80K/km であるとすると，A 地点の地下のモホロビチッチ不連続面における温度は［　**ア**　］℃である。また，A 地点における地殻熱流量は［　**イ**　］W/m^2 である。

B 地点における地下増温率が 20K/km であるとすると，B 地点の地下のモホロビチッチ不連続面における温度は［　**ウ**　］℃である。また，B 地点における地殻熱流量は［　**エ**　］W/m^2 である。

このように，地殻の厚さや熱伝導率が同じであるとき，地下増温率の大きい場所ほどモホロビチッチ不連続面の温度は高く，地殻熱流量は大きいといえる。

ここがPOINT

K と℃は温度および温度差の単位であり，温度差を表すときには 1K = 1℃です。
また，1km = 1000m であることにも注意しましょう！

問題⑵　地球の大気上端において，太陽放射に垂直な 1m^2 の面が1秒間に受ける太陽放射のエネルギーを太陽定数といいます。太陽定数を 1400W/m^2，地殻熱流量を 0.085W/m^2 とすると，太陽定数は地殻熱流量の約何倍でしょうか。上から2桁の概数で求めましょう。

第 3 講　PART1　確認問題

次の文章を読み，下の問いに答えよ。

問 1　地球内部から地殻を伝わり，地表の単位面積から単位時間に放出される熱量を ${}_a$地殻熱流量という。伝わる熱の大きさは単位深さあたりの温度差である（　ア　）に比例し，その比例定数を（　イ　）という。地殻熱流量の平均的な値を比較すると，大陸地域より海洋地域の方が（　ウ　）。海洋地域においては，海溝より海嶺の方が（　エ　）。また，日本列島において，火山前線から（　オ　）にかけてはこの熱量が大きい。

⑴　下線部 a について，地球全体でみたときの地殻熱流量の平均値として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① 0.08 ~ 0.09W/m^2　　② 0.8 ~ 0.9W/m^2
③ 8 ~ 9W/m^2　　④ 80 ~ 90W/m^2

⑵　空欄ア，イ，オに当てはまる語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① ア：熱伝導率，イ：地下増温率，オ：日本海側
② ア：熱伝導率，イ：地下増温率，オ：太平洋側
③ ア：地下増温率，イ：熱伝導率，オ：日本海側
④ ア：地下増温率，イ：熱伝導率，オ：太平洋側

⑶　空欄ウ，エに当てはまる語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① ウ：大きい，エ：大きい
② ウ：大きい，エ：小さい
③ ウ：小さい，エ：大きい
④ ウ：小さい，エ：小さい

< Note >

PART2 地球内部の熱源

目標　地球内部の主要な 2 つの熱源について説明することができる。

Chapter1　地球内部の熱源

地殻を通して地表へと流れてくる熱は，どこからやってくるのでしょうか。

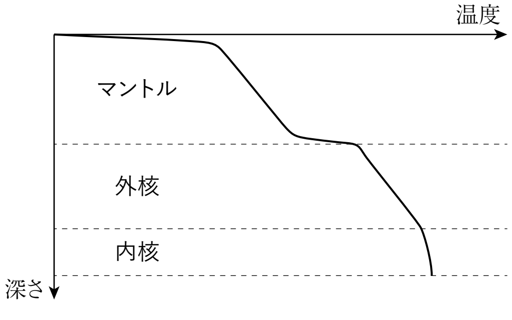
地球内部の温度構造

・熱のおもな伝わり方

地殻ではおもに伝導により熱が伝わっている。一方，マントルや外核では，おもに（対流 / 放射）によって熱が伝わっている。

・地球内部の温度構造

地球中心部の温度は約（5000℃ / 1000 万℃）に達すると考えられているが，あまりはっきりとはわかっていない。大まかな温度分布は，次の図のように推定されている。



知っておこう

地球内部の温度を直接推定する方法はありません。地球内部の温度分布を見積もるための研究の一つが，超高圧下での物質の融点や地震波速度などを実験により求めることです。その結果を地震波速度などの観測結果と組み合わせることで，地球内部の温度は見積もられているのです。

地球内部の熱源

・地球形成時の熱

地球は，微惑星の集積によって形成され，大部分が融けるほどの高温になった。核やマントルにたくわえられたこのときの熱は，地球の歴史を通して少しずつ放出されている。これが，現在の地殻熱流量の約半分を占めていると考えられている。

・放射性同位体の発熱

岩石中には放射性同位体が含まれている。岩石中の放射性同位体は，崩壊にともなって熱を放出する。この熱が，現在の地殻熱流量のうち地球形成時の熱以外の部分を占めていると考えられている。

現在の地球では，放射性同位体の発熱量のうちU〔ウラン〕とTh〔トリウム〕の崩壊によるものがそれぞれ約40%，K〔カリウム〕の崩壊によるものが約20%を占める。これらの元素にはSiO_2の割合の（大きい / 小さい）火成岩に多く含まれる性質があり，単位質量あたりの発熱量は

マントル　＜　海洋地殻　＜　大陸地殻

である。

覚えておこう

一部の原子核は，自発的にα線やβ線などと呼ばれる放射線を放って別の原子核になります。この現象を原子核の**崩壊**，原子核が放射線を放つ性質を放射能と呼びます。また，放射能をもつ同位体を**放射性同位体**と呼びます。

まとめ

・地殻熱流量のおよそ半分は，地球形成時の熱が内部に蓄積されたものである。
・地殻熱流量のうち地球形成時の熱以外の部分を占めているのは，__________の崩壊にともなって発生する熱である。その単位質量あたりの発熱量は，マントル，海洋地殻，大陸地殻のうち__________が最も大きい。

Chapter2　演習問題

ここでは，地球の熱史について考えてみましょう。

問題(1)　次の表は，代表的な放射性同位体の半減期を示しています。放射性同位体に関連して述べた下の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

放射性同位体	^{232}Th	^{238}U	^{40}K
半減期〔億年〕	140	45	12

放射性同位体は，一定の時間ごとに一定の割合で他の原子核に崩壊していく性質をもつ。放射性同位体が崩壊によって元の量の半分になるまでの時間を半減期といい，温度や圧力などの条件によらず一定の値をとることが知られている。

地球が形成されたのは，現在から約（140 / 46）億年前のことである。そのため，半減期が45億年の ^{238}U は，地球が形成されたころには現在のおよそ（8分の1 / 2分の1 / 2倍 / 8倍）存在していたと考えられる。 また，半減期が12億年の ^{40}K は，現在のおよそ（16分の1 / 4分の1 / 4倍 / 16倍）存在していたと考えられる。放射性同位体の量と発熱量は比例するので，地球が形成されたころの放射性同位体による発熱量は，現在とくらべて（大きかった / 小さかった）と考えられる。

知っておこう

左の表では，放射性同位体の元素の記号の左上に数値が書かれています。これは質量数と呼ばれる数値で，原子核を構成する陽子と中性子の個数の合計を表しています。ある元素の原子核に着目したとき，陽子の数は決まっていますが，中性子の数は何通りかの値をとります。この中性子の数が異なるものを同位体と呼ぶのです。

たとえば，自然界に存在するK〔カリウム〕の約93%は原子核が陽子19個と中性子20個から構成されている ^{39}K であり，これは放射能をもたない同位体（安定同位体）です。それに対して，^{40}K は原子核が陽子19個と中性子21個からなり，放射能をもつ放射性同位体です。

問題⑵　地球の歴史と内部構造の進化について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

地球形成時に核やマントルがたくわえた熱は，時間とともに宇宙空間に放出されていく。また，**問題⑴**で考えたように，放射性同位体による発熱量は時間とともに（増加 / 減少）していく。したがって，地球内部の温度は時間とともに（上昇 / 低下）し，地球内部から地殻を通して宇宙空間へと放出される熱量は時間とともに（増加 / 減少）する。

ここで，地球の核について考えると，内核は（固体 / 液体）であり，温度が融点よりも（高い / 低い）。一方，外核は（固体 / 液体）であり，温度が融点よりも（高い / 低い）。よって，地球内部の温度が変化することで，地球形成時から現在までに内核の半径は（大きくなってきた / 小さくなってきた）と考えられる。

第 3 講　PART2　確認問題

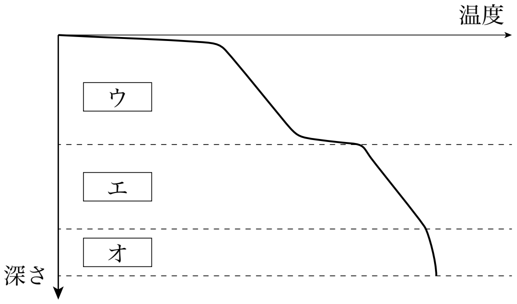
次の文章を読み，下の問いに答えよ。

問 1　地殻では，おもに（　ア　）により熱が伝わっている。一方，マントルや外核では，おもに（　イ　）によって熱が伝わっている。

空欄ア，イに当てはまる語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① ア：伝導，イ：対流　② ア：伝導，イ：放射
③ ア：対流，イ：伝導　④ ア：対流，イ：放射

問 2　地球内部の温度構造について，以下の図の空欄ウ～オに当てはまる語句の組合せとして最も適当なものを，下の①～④のうちから一つ選べ。



① ウ：マントル，エ：内核，オ：外核
② ウ：外核，エ：マントル，オ：内核
③ ウ：外核，エ：内核，オ：マントル
④ ウ：マントル，エ：外核，オ：内核

問３　地殻熱流量のうち，（　カ　）が約半分を占めている。それ以外の部分を占めていると考えられているのは，（　キ　）であり，大陸地殻と海洋地殻では，その単位質量あたりの発熱量は，（　ク　）の方が大きい。

　空欄カ～クに当てはまる語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　カ：放射性同位体の崩壊にともなって発生する熱
　　キ：地球形成時の熱
　　ク：大陸地殻

②　カ：地球形成時の熱
　　キ：放射性同位体の崩壊にともなって発生する熱
　　ク：大陸地殻

③　カ：地球形成時の熱
　　キ：放射性同位体の崩壊にともなって発生する熱
　　ク：海洋地殻

④　カ：放射性同位体の崩壊にともなって発生する熱
　　キ：地球形成時の熱
　　ク：海洋地殻

第 4 講　地磁気

PART1 地磁気の三要素

目標　地磁気の三要素とは何か，例を挙げて説明できる。

Chapter1　地磁気の三要素

方位磁針は北を指すので，山登りや航海などでは古くから利用されてきました。磁石を用いて方角を知ることができるのは，地球が一定の方向の地磁気をもっている，つまりひとつの磁石のような性質をもっているからです。この地磁気は，どのようにして表されるのでしょうか。

地磁気の要素

・地磁気の表し方

重力と同様に，地磁気も３次元空間内で向きと大きさをもった量として表される。

・地磁気の向き

偏角……水平面上で，地磁気が地図上の北〔真北〕となす角度

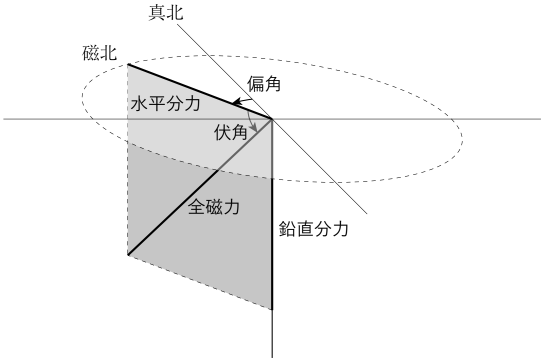
伏角……鉛直面上で，地磁気が水平面となす角度

・地磁気の大きさ

全磁力………３次元空間内での地磁気の大きさ

水平分力……水平方向の地磁気の大きさ

鉛直分力……鉛直方向の地磁気の大きさ



覚えておこう

「鉛直」とは，水平面と垂直な方向を指します。

覚えておこう

左の図の真北(しんぼく)は地図上の北，磁北は方位磁針の指す北に対応します。ほとんどの場合，方位磁針の指す北は地図上の北とは少しずれているのです。

・地磁気の三要素

3 次元空間内の地磁気の向きと大きさを特定するためには，地磁気を表す要素のうち少なくとも 3 つの要素を用いる必要がある。たとえば,

・伏角,（偏角 / 水平分力），全磁力

・（偏角 / 伏角），水平分力，鉛直分力

などの 3 つの要素を用いることで，地磁気の向きと大きさを特定することができる。このような要素の組を**地磁気の三要素**という。

まとめ

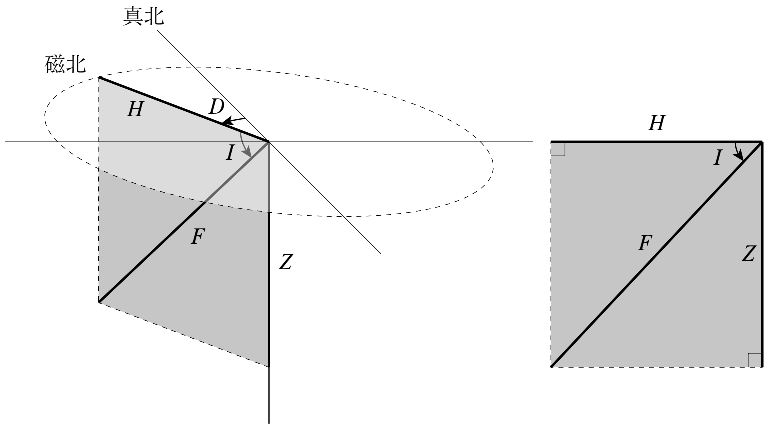
・地磁気の三要素は，地磁気の向きと________を特定することができるような，地磁気を表す要素の組である。

・地磁気を表す要素としては，水平面上で地磁気が真北となす角である________や，鉛直面上で地磁気が水平面となす角である________，3 次元空間内における地磁気の大きさである________などが用いられる。

Chapter2　演習問題

　ここでは，三角比の考え方を用いて，地磁気の三要素に関する理解を深めましょう。

問題(1)　次の図は，地磁気を表す要素の関係を示しています。地磁気の向きを表す D, I および地磁気の大きさを表す H, F, Z の名称を答えましょう。ただし，右の図は，左の図中の灰色の部分を描いた平面図です。



問題(2)　$H = 30000\mathrm{nT}$，$I = 50°$とします。このとき，F，Zはそれぞれ何nTでしょうか。上から2桁の概数で求めましょう。ただし，$\sin 50° = 0.77$，$\cos 50° = 0.64$，$\tan 50° = 1.2$とします。なお，nTは「ナノテスラ」と読み，地磁気の大きさを表すときに用いられる単位です。

復習

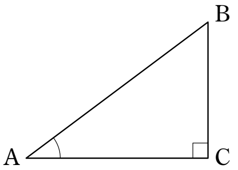
三角比（数学Ⅰ）
次の図で，

$$\sin A = \frac{BC}{AB}$$

$$\cos A = \frac{AC}{AB}$$

$$\tan A = \frac{BC}{AC}$$

です。



問題(3)　$H = 26000\mathrm{nT}$，$F = 52000\mathrm{nT}$とします。このとき，Iは何度で，Zは何nTでしょうか。上から2桁の概数で求めましょう。ただし，$\sqrt{3} = 1.7$とします。

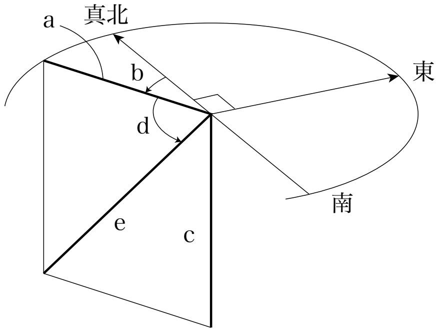
問題(4)　地磁気の三要素について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

　問題(2)(3)で実際に計算したように，**問題**(1)の図中の灰色の長方形の形と大きさは，I, H, F, Zのうち少なくとも（1つ／2つ）がわかれば1つに特定することができる。しかし，この長方形自体の向きをI，H，F，Zだけで表すことはできない。したがって，地磁気の要素としてD, I, H, F, Zを考えたとき，地磁気の三要素には（D／I）が不可欠だといえる。

第４講　PART1　確認問題

次の文章を読み，下の問いに答えよ。

問１　次の図は地磁気を構成する要素を表したもので，下のＡ～Ｄは，それらを説明したものである。



Ａ：３次元空間内での地磁気の大きさ

Ｂ：水平方向の地磁気の大きさ

Ｃ：水平面上で，地磁気が真北となす角度

Ｄ：鉛直面上で，地磁気が水平面となす角度

⑴　Ａ～Ｄの説明が表す要素の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①	Ａ：鉛直分力	Ｂ：全磁力	Ｃ：偏角	Ｄ：伏角
②	Ａ：鉛直分力	Ｂ：全磁力	Ｃ：伏角	Ｄ：偏角
③	Ａ：全磁力	Ｂ：水平分力	Ｃ：伏角	Ｄ：偏角
④	Ａ：全磁力	Ｂ：水平分力	Ｃ：偏角	Ｄ：伏角

⑵　Ａ～Ｄの説明が表す要素と図中の記号の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①	Ａ：e	Ｂ：a	Ｃ：b	Ｄ：d
②	Ａ：e	Ｂ：a	Ｃ：d	Ｄ：b
③	Ａ：a	Ｂ：c	Ｃ：b	Ｄ：d
④	Ａ：a	Ｂ：c	Ｃ：d	Ｄ：b

⑶　地磁気の三要素の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　鉛直分力，伏角，全磁力

②　全磁力，伏角，水平分力

③　鉛直分力，伏角，水平分力

④　全磁力，伏角，偏角

PART2 地磁気の分布

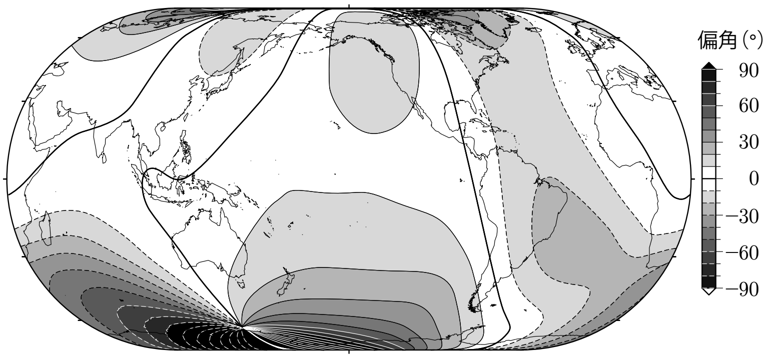
目標　地球上で緯度とともに伏角がどのように変化するか，理由とともに説明できる。

Chapter1　地磁気の分布

地磁気の正確な分布を知ることは，船や航空機の安全な運航のために欠かせません。たとえば，偏角が西に 6°であることを知らず，方位磁針が正確に北を指していると考えて「北」に 100km 進むと，想定より西へ 10km 以上も離れた場所に到達してしまいます。地球全体でみたとき，地磁気はどのような分布になっているのでしょうか。

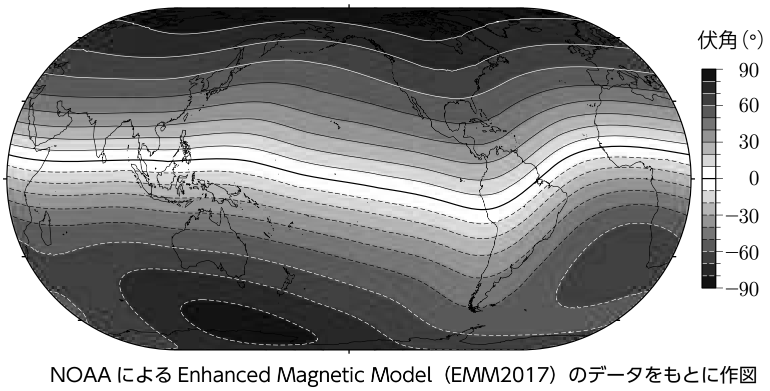
地球全体の地磁気の分布

・偏角



NOAA による Enhanced Magnetic Model（EMM2017）のデータをもとに作図

・伏角



NOAA による Enhanced Magnetic Model（EMM2017）のデータをもとに作図

知っておこう

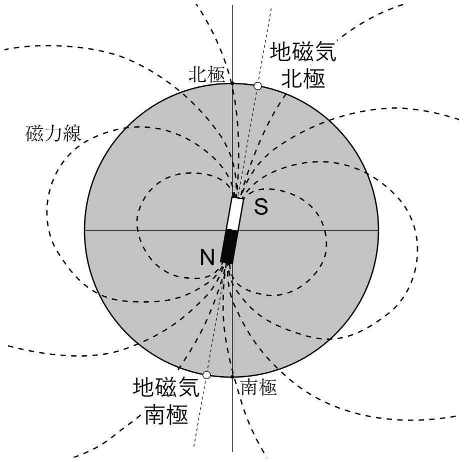
通常，偏角は東向きを正，伏角は水平面より下向きを正とします。左の図は，いずれもそのように描かれています。

ただし，日本列島周辺では偏角が西向きになっているため，日本列島だけの偏角の分布を示した図では西向きを正としていることもあります。地磁気の図を読み取るときには，図の説明にも注意しましょう！

・**地磁気極と磁極**

地磁気は，北半球に（N 極 / S 極）がある仮想的な棒磁石による磁場で近似できる。その仮想的な棒磁石の向きは地球の自転軸と完全には一致せず，約（1° / 10°）傾いている。この仮想的な棒磁石の延長線と地表との交点を**地磁気極**〔地磁気北極，地磁気南極〕という。

地磁気が 1 つの棒磁石によって完全に説明できるならば，赤道付近〔地磁気極から 90°離れた地点〕では磁力線が地表と平行なので伏角が 0°，地磁気極では磁力線が地表と垂直なので伏角が ± 90°となると考えられる。実際に，前ページの図でも伏角の絶対値は赤道付近で小さく，極付近で大きくなっている。しかし，実際の地磁気は棒磁石によるものとは少し異なっているため，伏角が ± 90°となる点は地磁気極と異なっている。実際に伏角が ± 90°となる点は**磁極**〔磁北極，磁南極〕と呼ばれている。



まとめ

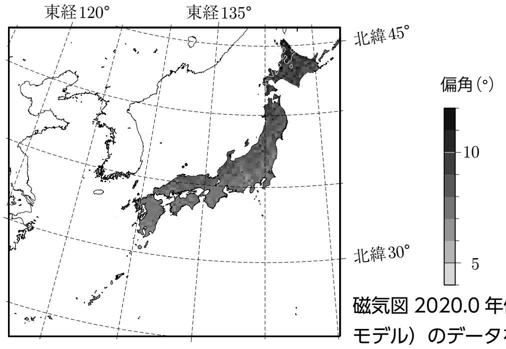
・地磁気は，北半球に＿＿極をもつ棒磁石による磁場により近似できる。この棒磁石は，自転軸から約＿＿＿°傾いている。

・この棒磁石による磁力線は赤道付近で地表と＿＿＿になり，極付近で地表と＿＿＿になる。そのため，伏角の絶対値は＿＿＿付近で小さく，＿＿＿付近で大きい。

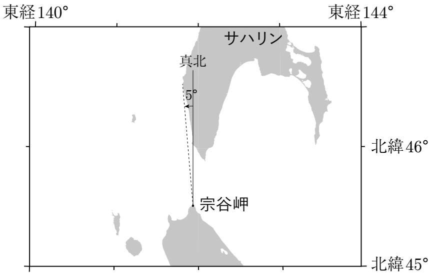
Chapter2　演習問題

ここでは，日本列島における偏角や伏角について確認してみましょう。

問題⑴　次の図は，日本列島における偏角の分布を示したものです。この図に関連して述べた下の文章中の(　　)について，正しいものを選びましょう。ただし，この図中の偏角の値は西向きを正としたものです。



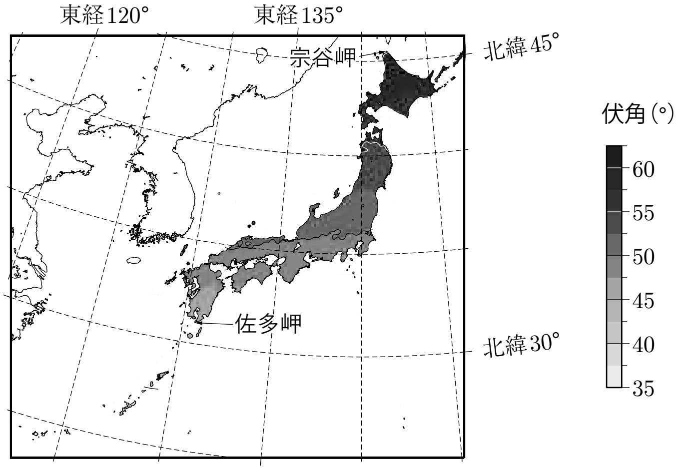
磁気図 2020.0 年値（国土地理院モデル）のデータをもとに作図



日本列島では，北に行くほど偏角の値が（大きい / 小さい）。

たとえば，北海道の宗谷岬から見たとき，サハリンの西端は真北から（東 / 西）に約 5°離れている。また，宗谷岬における偏角は西に約（5° / 10°）なので，サハリンの西端は磁北から（東 / 西）に約（5° / 15°）離れている。つまり，サハリンは実際には宗谷岬から見て（真北より東側にある / 真北をはさんで東西に広がっている）が，方位磁針にしたがうと（北より東側にある / 北をはさんで東西に広がっている）ように見える。

問題⑵　次の図は，日本列島における伏角の分布を示したものです。この図に関連して述べた下の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。なお，この図中の伏角の値は水平面より下向きを正としたものです。また，$\sqrt{2} = 1.4$ とします。



磁気図 2020.0 年値（国土地理院モデル）のデータをもとに作図

日本列島では，北に行くほど伏角の値が（大きい / 小さい）。

たとえば，九州南端の佐多岬では伏角が約（45° / 60°），北海道北端の宗谷岬では伏角が約（45° / 60°）である。これらの 2 地点で全磁力が同じだと仮定すると，宗谷岬における水平分力は，佐多岬における水平分力の約（0.5 / 0.7 / 1.4 / 2）倍だと考えられる。

ここがPOINT

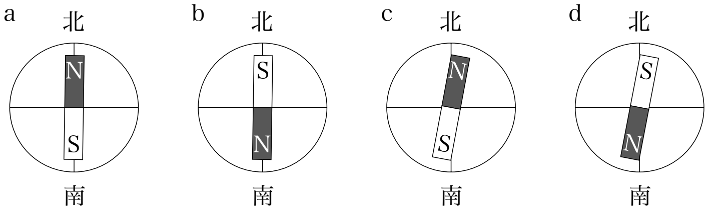
佐多岬と宗谷岬のそれぞれについて，伏角，全磁力，水平分力の関係を表す図を描いて考えてみましょう！

第４講　PART2　確認問題

次の文章を読み，下の問いに答えよ。

問１　地磁気は a 地球の内部に棒磁石を置いたときの磁場に似ている。この棒磁石の延長と地表との交点を(　ア　)というが，実際の地磁気は棒磁石による磁場と異なっているため，伏角が± 90°になる点は（　ア　）からずれている。実際に伏角が± 90°となる点を（　イ　）という。また，赤道付近では磁力線が地表とほぼ平行になるので，伏角の大きさは最も小さくなっている。

(1)　下線部 a について，地磁気を近似する地球内部の棒磁石の配置として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。



①　a　　②　b　　③　c　　④　d

(2)　空欄アに当てはまる語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　N 極　　②　磁極
③　地磁気極　　④　S 極

(3)　空欄イに当てはまる語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　N 極　　②　磁極
③　地磁気極　　④　S 極

⑷　本州における伏角のおよその値として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。ただし，N 極が水平面より下向きを正とする。

①　－ 50°　　②　－ 15°

③　＋ 15°　　④　＋ 50°

PART3 地磁気の変化

目標　さまざまな時間スケールの地磁気の変化について，その原因に触れて説明できる。

Chapter1　地磁気の長周期変化

ここまでに，地球全体や日本列島における地磁気の要素の分布について学びました。このような分布は，地球の歴史を通してどのように変化してきたのでしょうか。

地磁気の逆転

・残留磁気

磁鉄鉱をはじめとする一部の鉱物は，外部から磁気を与えられると磁石になる性質をもつ。このような鉱物を**磁性鉱物**という。

マグマが固結して火成岩となるとき，磁性鉱物は冷却されたときの地磁気の向きに磁化される。これによって火成岩に記録される磁気を**熱残留磁気**という。

また，磁性鉱物が砕屑物として水中を沈降して堆積するとき，地磁気の向きに並ぶことがある。これによって堆積岩に記録される磁気を**堆積残留磁気**という。

これらの残留磁気をくらべると，（熱残留磁気 / 堆積残留磁気）の方が大きい。

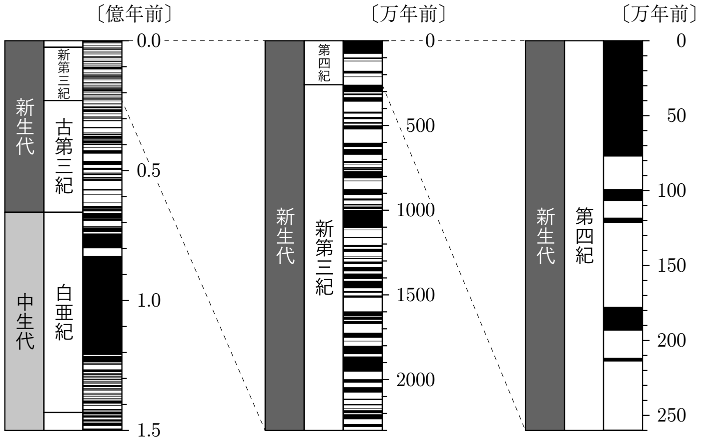
・地磁気の逆転

残留磁気の研究から，過去には地磁気が現在とは逆を向いている時期があったことが知られている。平均的な逆転の周期は数十万年だが，一定ではない。

次のページの図において，黒い部分は地磁気が現在と同じ向き，白い部分は地磁気が現在と逆の向きであったことを表している。

知っておこう

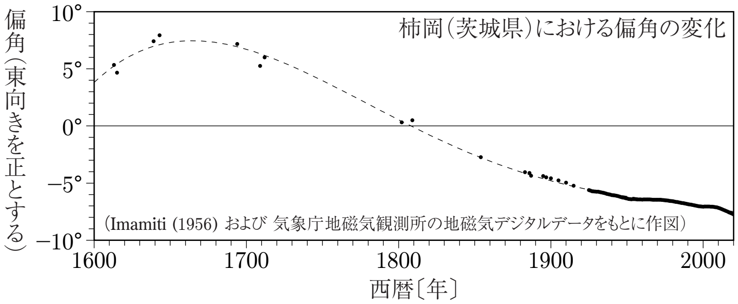
過去に地磁気の逆転が起こっていたとする考え方は，松山基範によって 1929 年に発表されました。彼は兵庫県や京都府，朝鮮半島，満州で採取された第四紀の玄武岩について，残留磁気を測定しました。そして，新しい玄武岩の残留磁気は現在と同じ向きであり，古いものは現在と逆向きであることから，第四紀に地磁気の逆転が起こったと考えたのです。



地磁気の永年変化とダイナモ理論

・永年変化

地磁気は，逆転をしない時期でも，数百年～数千年程度の時間スケールで変化している。これを地磁気の**永年変化**という。



・ダイナモ理論

地球の内部は高温であり，鉄や磁性鉱物があっても永久磁石になることができない。地磁気は，液体の鉄が外核を流動することで安定的に存在していると考えられている。この考え方を**ダイナモ理論**という。地磁気の逆転や永年変化といった長い時間スケールの現象は，この外核における流動によるものである。

まとめ

- 平均数十万年のスケールで，地磁気は逆転をくり返している。
- 数百年～数千年程度の時間スケールでの地磁気の変化を地磁気の__________という。この変化や地磁気の逆転は，外核における液体の鉄の流動によって生じる。

Chapter2　地磁気の短周期変化

地磁気は，数時間～数十年という短い時間スケールでも変動しています。このような変化は,何によって引き起こされるのでしょうか。

地球磁気圏

・太陽風

太陽の大気では，水素などの原子が高温により陽子や電子などの電気を帯びた粒子に分かれた状態になっている。このような状態をプラズマといい，太陽はプラズマを宇宙空間に放出している。このプラズマの流れを**太陽風**という。太陽風は秒速（数百 km ／ 30 万 km）で宇宙空間を進み，地球軌道にも到達する。

知っておこう

太陽は水素を主成分とする巨大なガス球であり，上空にはコロナと呼ばれる希薄な大気をもちます。

　なお，太陽の構造や活動については天文分野で詳しく扱います。

・地球磁気圏

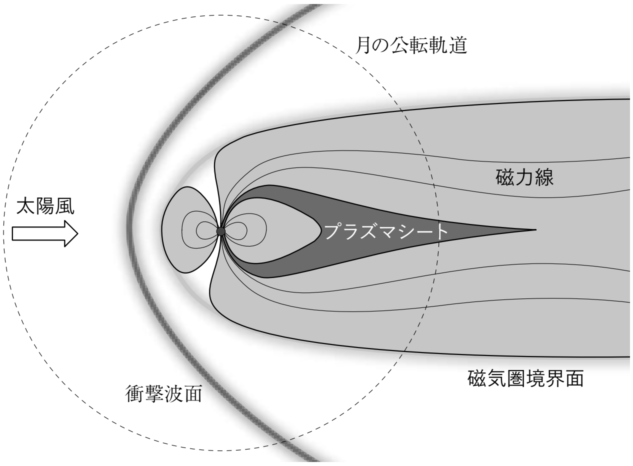
地球の磁場が太陽風によって閉じ込められた領域を**地球磁気圏**といい，太陽風との境界を**磁気圏境界面**という。地球磁気圏は，昼側〔太陽に近い側〕で地球半径の十倍程度，夜側〔太陽と反対側〕では地球半径の数百倍程度の範囲まで広がっている。

夜側にはプラズマの層が形成され，これを**プラズマシート**という。太陽風が強まると，プラズマシートの荷電粒子が磁力線に沿って地球の高緯度地域の上空に流れ込んで**オーロラ**という発光現象が発生することがある。

覚えておこう

太陽風は高いエネルギーをもったプラズマの流れなので，地球表面に降り注いだとすると生物に大きな影響を与えます。

　地球磁気圏には，太陽風から地球表面の生物を守るはたらきがあるといえるのです。



地磁気の短周期変化

・地磁気の短周期変化とその原因

地磁気の短周期変化は，さまざまな要因によって地球磁気圏に生じる変化が原因となっている。

およその周期	おもな要因
11 年	太陽活動の周期的な変動
1 年	地球の（公転 / 自転）
1 か月	太陽の自転
1 日	地球の（公転 / 自転）

・地磁気の突発的な変化

太陽表面で爆発現象が起こると，太陽風の速度やプラズマの密度が大きくなる。このときに生じる地球磁気圏の突発的な変化を**磁気嵐**（あらし）という。大規模な磁気嵐では，数時間以内のうちに全磁力が最大で（1% / 10%）程度変化することがある。

まとめ

・数時間～数十年程度の短い時間スケールでの地磁気の変化は，さまざまな要因により＿＿＿＿＿＿に生じる変化が原因となっている。

・太陽から放出されるプラズマの流れである＿＿＿＿が強まると，地球の高緯度では発光現象である＿＿＿＿が発生することがある。

Chapter3　演習問題

ここでは，地磁気の変化についての文章を読み，地磁気の変化についての理解を深めましょう。

問題⑴　地磁気の逆転に関連して述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

地磁気の逆転は，さまざまな地点での分析結果をもとにして詳しい年表が作成されている。それによると，地磁気の逆転が起こった年代のいくつかは，地質時代の境界に近い。

たとえば，260 万年前には地磁気の向きが現在と同じ向きから現在と逆向きへと変化したと考えられている。この年代は，（三畳紀 ／ 第四紀）の始まりである 258 万年前に近い。また，77 万年前には地磁気の向きが現在と逆向きから現在と同じ向きへと変化したと考えられている。この年代は，（チバニアン ／ 完新世）と呼ばれている地質時代の始まりと一致する。

ここで，地質時代の境界の多くは生息する生物種の変化に基づいて定められている。よって，地磁気の逆転の年代が地質時代の境界と近いことからは，地磁気の逆転が生物種の変化と関係している可能性があるといえる。

問題⑵ 磁気嵐に関連して述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

磁気嵐は，太陽表面で爆発現象が起こったときに太陽からの（電磁波 / プラズマ）の流れが強まり，地球磁気圏に生じる突発的な変化である。

電磁波は秒速（数百 km / 30 万 km)，プラズマは秒速（数百 km / 30 万 km）で太陽から地球へと到達する。そのため，太陽から地球までの 1 億 5000 万 km を進むためにかかる時間を考えると，電磁波は（約 8 分 / 数日)，プラズマは（約 8 分 / 数日）である。

よって，太陽表面における爆発現象が電磁波により観測されたとき，磁気嵐は（すでに発生している / まだ発生していない）といえる。

第4講　PART3　確認問題

次の文章を読み，下の問いに答えよ。

問1　地磁気は，a外核にある液体の鉄が流動することにより生み出されており，この流動の何らかの変化が原因で，地磁気の永年変化や逆転が生じていると考えられている。

地磁気の逆転は，火成岩や堆積岩の中に記録された地磁気を調べることによって知ることができる。このような岩石の中に記録された地磁気のことを（　ア　）という。

(1)　下線部ａについて，地磁気の原因に関するこの理論の名称として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① ダイナモ理論　② コロナ
③ ジオイド　④ アイソスタシー

(2)　空欄アに当てはまる語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① 全磁力　② 磁気異常
③ 残留磁気　④ 磁極

問２　地磁気の影響で地球のまわりには磁場が発生しているが，bたいよう太陽から流れ出してくる荷電粒子の流れによって閉じ込められており，(　イ　)を形成している。太陽の表面で爆発現象であるフレアが発生すると，c地磁気が急激に変化するなど様々な現象が発生することがある。このような地磁気の変化は，地球の磁場が安定しているときには，短い周期で規則的な変化をしておりd短周期変化とよばれる。

(1)　下線部ｂについて，太陽から流れ出してくる荷電粒子の流れの名称として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ダイナモ　　②　コロナ

③　オーロラ　　④　太陽風

(2)　空欄イに当てはまる語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　地球磁気圏　　②　プラズマシート

③　磁気圏境界面　　④　衝撃波面

(3)　下線部ｃについて，地磁気が急激に変化する現象を何とよぶか。最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　オーロラ　　②　エルニーニョ現象

③　磁気嵐　　④　地磁気の逆転

(4)　下線部ｄについて，短周期変化のおもな要因として誤っているものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　地球の自転　　②　地球の公転

③　太陽の自転　　④　月の公転

第5講　プレートテクトニクス

PART1 プレート境界と大地形

目標　プレートの収束境界に形成される大地形について，具体的な例を挙げて説明できる。

Chapter1　プレート境界と大地形

地学基礎では，プレート境界と大地形との関係について学びました。ここでは，具体的な例を含めて少し詳しく見ていきましょう。

プレートとその境界

・**プレートとその構造**

リソスフェア……地殻と上部マントルの一部を合わせた領域。地表付近にあって，比較的かたい部分。プレートはこの部分であり，地球全体は（十数枚 / 数十枚）のプレートに覆われている。

アセノスフェア…上部マントルのうち，リソスフェアの下にあって比較的やわらかい部分。地震波の（高速度層 / 低速度層）にあたる。

・**プレートの境界** 地学基礎

発散境界………プレートどうしが離れていく境界。 海洋では海嶺，大陸では地溝帯が形成される。

収束境界………プレートどうしが近づく境界。一方のプレートが沈み込むと海溝，互いに衝突すると大山脈が形成される。

すれ違い境界…プレートどうしがすれ違う境界。おもに海嶺がずらされており，この境界にできる横ずれ断層をトランスフォーム断層という。

復習

地表付近の構造（地学基礎）
物質による分類
地殻：玄武岩や花こう岩
上部マントル：かんらん岩
かたさによる分類
リソスフェア：かたい
アセノスフェア：やわらかい

知っておこう

地震波速度は地盤がかたいほど大きく，やわらかいほど小さくなります。

プレート境界と大地形

・海嶺

海洋底からの高さが数千 m に達する山脈状の地形。中央の海嶺軸では新しいプレートが形成されている。

（例）大西洋中央海嶺

・島弧と陸弧

プレートの沈み込む境界である海溝では，沈み込まれる側のプレート上において海溝に沿った火山の列が形成される。この部分を**火山弧**，その海溝側を**前弧**，大陸側を**背弧**という。

島弧……背弧に日本海のような**縁海**を伴うもの
（例）日本列島

陸弧……背弧に日本海のような縁海を伴わないもの
（例）アンデス山脈

・衝突境界の大山脈

プレートの収束境界において陸地〔大陸や島弧〕どうしが衝突すると，大山脈が形成される。水平方向の圧縮の力が強くはたらくため，（正断層 / 逆断層）や褶曲構造が形成される。

（例）ヒマラヤ山脈

まとめ

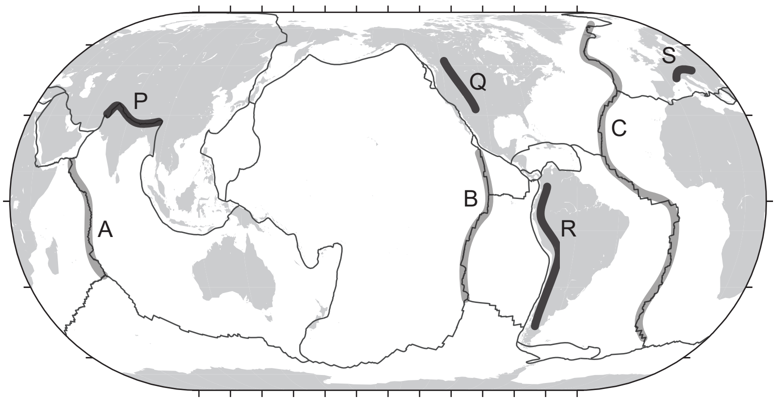
・プレートの沈み込む境界では海溝に沿って火山列が形成され，これを________という。その大陸側に__________をもつものを島弧といい，もたないものを陸弧という。日本列島は________，アンデス山脈は________の例である。

・プレートの収束境界において陸地どうしが衝突すると，大山脈が形成される。ヒマラヤ山脈はその代表例である。

Chapter2　演習問題

ここでは，代表的なプレート境界について，その特徴を確認しましょう。

問題⑴　次の図は，地球上の主要なプレート境界を描いたものです。この図について述べた下の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

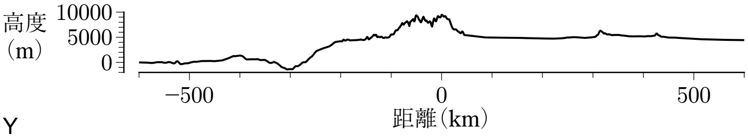


プレートの発散境界の多くは海洋に存在する。大西洋中央海嶺は図中の（A / B / C）にあたる。この海嶺はトランスフォーム断層と呼ばれる（正断層 / 逆断層 / 横ずれ断層）によって切られている。

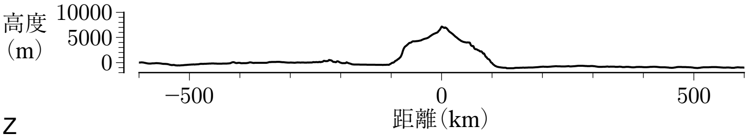
プレートの収束境界のうち，一方のプレートが他方の下に沈み込む場所は海溝と呼ばれる。海溝に沿って火山列が形成されている部分を火山弧といい，日本列島や図中の（P / Q / R / S）にあたるアンデス山脈はその例である。また，プレートどうしが衝突する場所には大山脈が形成される。図中の（P / Q / R / S）にあたるアルプス山脈や，図中の（P / Q / R / S）にあたるヒマラヤ山脈は，ともにプレートの衝突にともなって形成されたものである。

問題⑵　次の図は，大西洋中央海嶺，アンデス山脈，ハワイ島を横切る断面図のいずれかです。X，Y，Zのそれぞれがどの地域の断面図に対応するのかを答えましょう。ただし，それぞれの図の縦軸は，図の左端を0mとした値です。

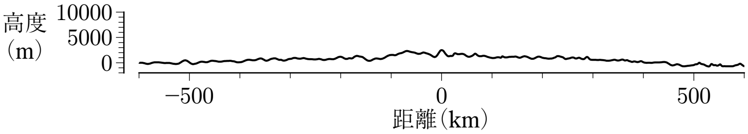
X



Y



Z



第５講　PART1　確認問題

次の文章を読み，下の問いに答えよ。

問１　地球の表面は，十数枚のプレートに覆われている。プレートは地殻と上部マントルの一部を合わせた部分であり，（　ア　）と呼ばれている。$_a$上部マントルのうち，（　ア　）の直下にある層は（　ア　）と異なる性質をもち，（　イ　）と呼ばれている。

(1)　空欄アに入る語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　外核　　②　内核

③　アセノスフェア　　④　リソスフェア

(2)　空欄イに入る語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　外核　　②　内核

③　アセノスフェア　　④　リソスフェア

(3)　下線部ａについて，この層の特徴として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　比較的やわらかく，地震波速度が大きい。

②　比較的やわらかく，地震波速度が小さい。

③　比較的かたく，地震波速度が大きい。

④　比較的かたく，地震波速度が小さい。

問２　地球の表面を覆っているプレートはつねに移動している。プレートどうしが離れる境界を（　ウ　）境界，近づく境界を（　エ　）境界，すれ違う境界を（　オ　）境界といい，それらの境界では b さまざまな大地形が形成されている。

⑴　空欄ウ～オに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①	ウ：収束	エ：発散	オ：すれ違い
②	ウ：発散	エ：収束	オ：すれ違い
③	ウ：発散	エ：すれ違い	オ：収束
④	ウ：すれ違い	エ：収束	オ：発散

⑵　下線部ｂについて，大陸プレートどうしが衝突して形成された大地形の例として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ヒマラヤ山脈　　②　日本列島
③　アンデス山脈　　④　大西洋中央海嶺

⑶　下線部ｂについて，プレートが沈み込む境界である海溝の陸側にできる島弧の例として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ヒマラヤ山脈　　②　日本列島
③　アンデス山脈　　④　大西洋中央海嶺

PART2 プレートテクトニクスの成立

目標　プレートテクトニクスの基礎となった大陸移動説や海洋底拡大説とはどのような考え方かを説明できる。

Chapter1　大陸移動説

プレートテクトニクスは，20世紀に確立された比較的新しい考え方です。ここでは，プレートテクトニクスの基礎となった大陸移動説について学びましょう。

ウェゲナーの大陸移動説

・古生物の分布

南米，アフリカ，インド，オーストラリアの古生代の地層からは，似たような陸上生物の化石が産出する。

・大陸移動説の主張と問題点

古生代後期に超大陸「**パンゲア**」が存在し，それが中生代以降に分裂して現在のような大陸配置になったと考えることで，古生物の分布だけでなく，古生代の氷河の痕跡や先カンブリア時代の岩石の分布など，多くのことがらを統一的に説明できる。この考え方を**大陸移動説**という。

しかし，大陸移動の原理を説明することができず，大陸移動説が多くの研究者に認められるには至らなかった。

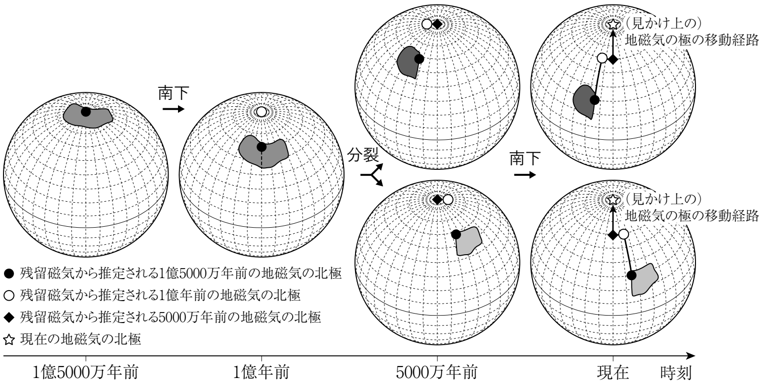
知っておこう

1912年，ドイツのウェゲナー(Alfred Wegener) は大陸移動説を発表しました。1930年，彼は大陸移動説が認められないまま探検中に亡くなりました。なお，彼の義父は気候区分で知られるケッペン (Wladimir Köppen) であり，古気候に関する論文を共同で執筆しています。

大陸移動の証拠

・地磁気の極の移動

1950 年代になると，残留磁気から過去の地磁気の極の位置が復元されるようになった。その結果，地磁気の極の位置が時代とともに変化して見えて，しかもその移動経路は大陸により異なることがわかった。



→大陸が異なる向きに移動したと考えることで，見かけ上の地磁気の極の移動を説明できる。

まとめ

・大陸移動説は，1912 年にドイツの＿＿＿＿＿＿が提唱した考え方である。

・彼は，古生代に超大陸＿＿＿＿＿＿＿が存在し，それが中生代以降に分裂したと考えたが，当時は受け入れられなかった。

・1950 年代には＿＿＿＿＿＿から過去の地磁気の極の移動経路が復元され，大陸移動の新たな証拠となった。

Chapter2　海洋底拡大説とプレートテクトニクス

大陸が移動した新たな証拠が出てきた 1950 年代，海洋についても新たな発見が続きました。ここでは，海洋底拡大説からプレートテクトニクスへの発展について学びましょう。

海洋底拡大説

・海底の調査の進展

・海嶺軸には裂谷が存在する

・海嶺周辺で地殻熱流量が（大きい / 小さい）

・海嶺付近の海底にはほとんど堆積物がない

・深海底の堆積物も厚さ（数 cm / 数百 m）に過ぎない

・海洋底に見られる古い火山島やその名残の火山岩には，中生代から現在にかけてのものしか存在しない

知っておこう

1960年から1962年にかけて，ともにアメリカのヘス (Harry Hammond Hess) とディーツ (Robert Dietz) は海洋底拡大説の考え方を独立に発表しました。彼らの考え方は細部において異なっていましたが，海洋底が海嶺で作られて海溝で沈み込み，これが大陸の移動を説明できるという点では一致していました。

1950 年代に得られたこれらの観測事実を説明する考え方として，上昇してきたマントル物質から海嶺で新しい地殻が形成され，その地殻はマントルの対流とともに移動して海溝で沈み込むという**海洋底拡大説**が提唱された。

知っておこう

1963 年，カナダのウィルソン (John Tuzo Wilson) は海山や火山島が海嶺から離れるほど古いことを海洋底拡大説と結び付けた論文を発表しました。同じ年の別の論文で，彼はハワイ諸島がマントル対流とは独立なマグマの供給源（現在ホットスポットと呼ばれているもの）によって形成された可能性について議論しています。

海洋底拡大説を支持する観測事実

・海山列の形成

海洋底にそびえる海山や火山島は，海嶺から離れるほど古い。

←これらの海山や火山島が，海嶺から海溝に向かって動く海洋底に乗って移動していると考えると説明できる。

・海洋底の年代

海洋底を形成する玄武岩の年代は，海嶺から離れるほど古い。

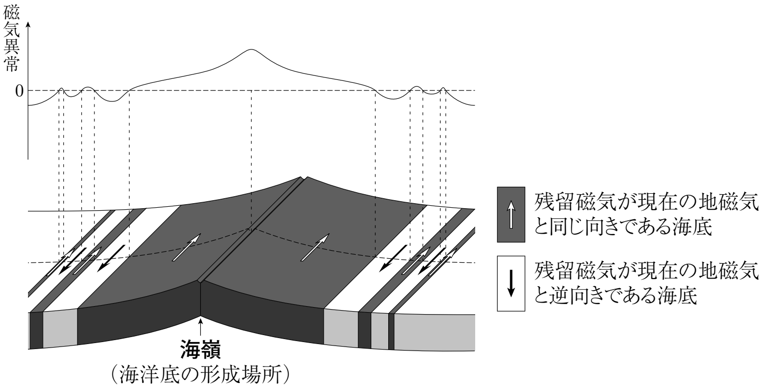
←新しい海洋底が海嶺で形成され，古いものが両側に押し出されていると考えると説明できる。

・磁気異常の縞模様

船に乗って海嶺軸と垂直な方向に地磁気を測定すると，全磁力の大きさが周期的に変化する。この全磁力の大きさの平均値からのずれを**磁気異常**といい，全磁力の大きさの± 1%程度に相当する。

知っておこう

1963年，イギリスのバイン(Frederick John Vine)とマシューズ(Drummond Hoyle Matthews)は，太平洋，大西洋，インド洋の海嶺付近で得られた磁気異常の分布を海洋底の拡大と結びつけた論文を発表しました。



←海底の岩石が現在と同じ向きの残留磁気をもてば磁気異常が正，海底の岩石が現在と逆向きの残留磁気をもてば磁気異常が負になる。地磁気が周期的に逆転し，海嶺で形成された岩石がそれを反映した残留磁気をもって海嶺から離れていくと考えると，周期的な磁気異常が説明できる。

覚えておこう

磁気異常の大きさは全磁力の大きさの1%程度に過ぎないので，残留磁気が現在の地磁気と逆向きの海底の上でも，方位磁針が逆向きになるわけではありません。地磁気が少しだけ弱く観測されるだけだということに注意しましょう！

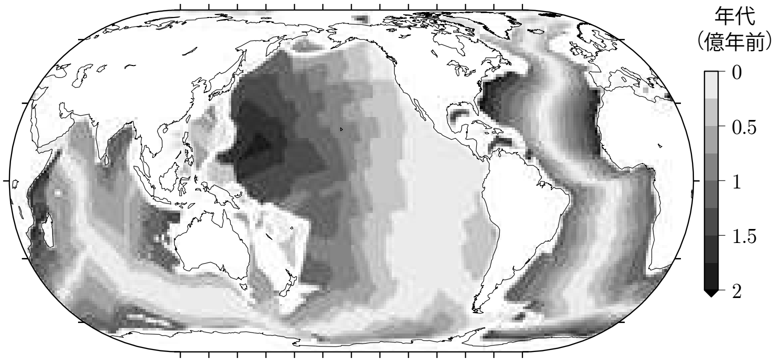
まとめ

・海洋底拡大説は，1960年代初頭にアメリカの＿＿＿＿＿とディーツによって独立に発表された考え方である。
・この考え方では，＿＿＿＿で形成された海洋底がマントル対流によって移動し，やがて＿＿＿＿で沈み込む。
・海洋底拡大説を支持する観測事実として，
　・海山や火山島，海洋底の玄武岩の年代が海嶺から離れるほど古いこと
　・海嶺と垂直な方向に，全磁力の大きさが周期的に変化する＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿が見られること
が挙げられる。

Chapter3　演習問題

ここでは，海洋底拡大説に関する観測事実について確認しましょう。

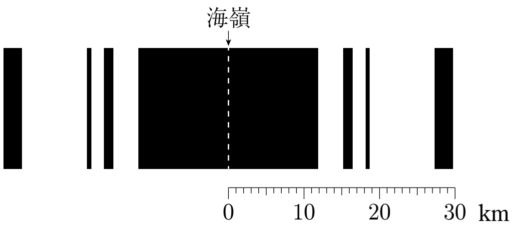
問題⑴　次の図は，海洋底の年代を示したものです。この図について述べた下の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

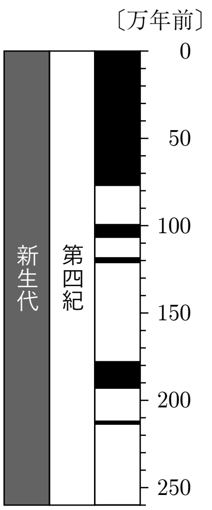


海洋底の年代が新しい部分は，（作られたばかりの / 作られてから長い時間の経った）部分である。この部分は（海嶺 / 海溝）の分布と一致しており，海洋底が（海嶺 / 海溝）で作られていると考える根拠の一つとなる。

また，図中の色分けは（250 万年 / 2500 万年）ごとになっており，その帯の 1 本ごとの幅をくらべると，大西洋より太平洋の方が（太い / 細い）。よって，大西洋より太平洋の方が海洋底の拡大速度は（大きい / 小さい）と考えられる。

問題⑵ 次の左の図は，ある海嶺の周辺の磁気異常の縞模様を模式的に示したものです。黒い部分は磁気異常が正の部分，白い部分は磁気異常が負の部分を表しています。また，次の右の図は，第四紀の地磁気の逆転のようすを示したものです。黒い部分は地磁気が現在と同じ向き，白い部分は地磁気が現在と逆の向きであったことを表しています。これらの図について述べた下の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。





左の図によると，海嶺付近の海洋底は地磁気が現在と（同じ / 逆の）向きのときに形成された海洋底である。これは，海嶺が（新しい海洋底が作られている / 古い海洋底が沈み込んでいる）部分であることに対応している。

また，この海嶺で形成された海洋底の一部分に着目すると，その部分は 100 万年あたり約（15km / 27km），すなわち 1 年あたり約（15mm / 27mm / 15cm / 27cm / 15m / 27m）の速さで海嶺から遠ざかっているといえる。

ここがPOINT

1mm = 10^{-3}m であることから，1m = 10^3mm です。1km = 10^3m であることとあわせると，
1km = (10^3 × 10^3)mm
すなわち
1km = 10^6mm
です。
さらに，「100 万年」は「10^6 年」と表せます。地学では年数を 100 万年単位で考えることが多いので，このことは頭に入れておくとよいでしょう。

第5講　PART2　確認問題

次の文章を読み，下の問いに答えよ。

問1　固体地球で起こる地震や火山といったさまざまな現象をプレートの運動により統一的に説明する考え方を，プレートテクトニクスという。この考え方の元となったものが，1912年にドイツの（　ア　）によって発表された<u>a 大陸移動説</u>である。（　ア　）は，古生代後期に超大陸（　イ　）が存在し，それが中生代以降に分裂して，現在のような大陸の配置になったと考えた。

大陸移動説は大陸を動かす原動力を説明することができず，やがて省みられなくなったが，1950年代になって<u>b 大陸が移動していることを示す新たな証拠が見つかったこと</u>から注目を集めることとなった。

(1)　空欄ア，イに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ア：ブーゲー　　イ：パンゲア
②　ア：ブーゲー　　イ：ゴンドワナ
③　ア：ウェゲナー　イ：パンゲア
④　ア：ウェゲナー　イ：ゴンドワナ

(2)　下線部 a について，大陸移動説の根拠として挙げられたものとして間違っているものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　古生代の氷河の痕跡の分布
②　新生代の地質構造の分布
③　古生代の陸上生物の分布
④　先カンブリア時代の岩石の分布

(3) 下線部bについて，大陸が互いに異なる向きに移動したことを示す証拠として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① 地磁気の強さが海嶺軸をはさんで対称に変化している。

② 海嶺周辺で地殻熱流量が大きい。

③ 海山や火山島の形成年代は海嶺から離れるほど古い。

④ 地磁気の北極の移動経路が大陸により異なっている。

問2 1950年代には，海洋調査の方法が発展し，さまざまな知見がもたらされた。それは海洋底の地形や地磁気，重力，地下構造など多岐にわたっており，それらを統一的に説明するものとして1960年代はじめに（　ウ　）が示された。

（　ウ　）では，（　エ　）が海嶺で上昇し，そこで新たな海洋底を形成する。そして，海嶺の両側に広がり，移動して，海溝で沈み込むと提唱された。

この考え方の根拠として，c海嶺軸と垂直な方向に地磁気を測定すると，地磁気の強さが強いところと弱いところが交互に並んでいるという現象が挙げられる。

(1) 空欄ウ，エに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① ウ：大陸移動説　　エ：マントル物質

② ウ：大陸移動説　　エ：残留磁気

③ ウ：海洋底拡大説　エ：マントル物質

④ ウ：海洋底拡大説　エ：残留磁気

(2) 下線部cについて，この現象として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① 磁気異常の縞模様

② 磁気異常のモザイク模様

③ ブーゲー異常の縞模様

④ ブーゲー異常のモザイク模様

PART3 プレートとマントルの動き

目標 プレートの移動を球面上の運動として説明できる。また，マントル対流とプレートの移動との関係を説明できる。

Chapter1　プレートとマントルの動き

地学基礎では，プレートがそれぞれ異なる方向に移動していることを学んでいます。球面上の板の運動は，どのような動きなのでしょうか。また，それはマントルの運動とどのように関係しているのでしょうか。

プレートの運動

・プレートとプレートテクトニクス

地震の分析から，北太平洋地域の海洋底全体は北西方向へと移動する1枚の板とみなすことができることが確かめられた。この変形しない板は**プレート**と呼ばれ，1960年代後半から1970年代にかけて，プレートどうしの運動によってさまざまな現象を説明する**プレートテクトニクス**という考え方が発展した。

・球面上の回転運動

球面上の板の運動は，ある軸のまわりの回転運動とみなせる。この回転の軸と球面との交点の1つをオイラー極という。

回転の角速度が一定のとき，球面上での実際の移動速度はオイラー極から離れるほど（大きい / 小さい）。

マントル対流

・地震波トモグラフィー

多くの地震の走時を多くの地点で観測した記録を用いることで，地下の地震波速度の3次元的な分布を推定する手法。

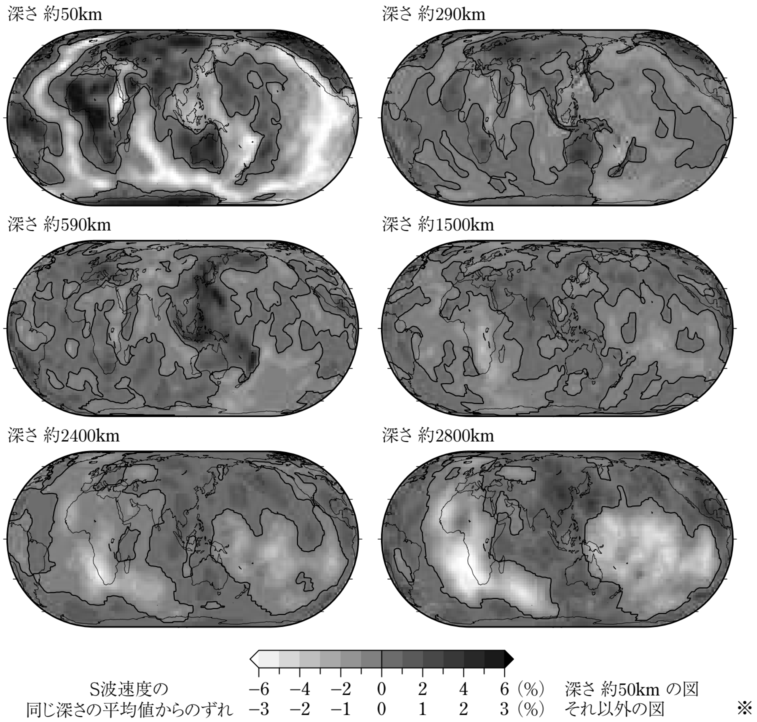
地震波速度	岩石のかたさ	温度
大	（かたい / やわらかい）	（高い / 低い）
小	（かたい / やわらかい）	（高い / 低い）

知っておこう

1967年，イギリス（当時アメリカの大学に在籍）のマッケンジー (Dan Peter McKenzie) とアメリカのパーカー (Robert Ladislav Parker) は，左の（北太平洋に関する）内容を論じた論文を共同で発表しました。この論文は，「プレート」という単語を用いて海洋底拡大と諸現象との関連を論じた最初の論文です。

アメリカのモーガン (William Jason Morgan) やフランス（当時アメリカの大学に在籍）のルピション (Xavier Le Pichon) も，トランスフォーム断層に着目することで「ブロック」（プレートに相当）の移動を説明した論文をほぼ同時期にそれぞれ発表しました。

海洋底拡大説の提唱から10年足らずの間に，プレートテクトニクスの考え方は欧米の研究者の間で活発に論じられ，急速に認められるようになったのです。



知っておこう

地震波トモグラフィーは，多くの地震の走時を多くの地点で観測した記録を用いることで，地下の地震波速度の 3 次元的な分布を推定する手法です。たとえば，左の図を描くために用いたデータは，約 55 万個の地震における約 1400 万個もの記録を用いて計算されたものです。この手法は，1980 年代以降の計算機の発達とともに発展してきました。

・**マントル対流とプレート**

プルーム……南太平洋や東アフリカにはマントル深部から上部マントルまで続く地震波の低速度領域があり，マントルの大規模な上昇流〔**プルーム**〕に相当すると考えられている。プルームの位置は，プレートの境界と無関係である。

下降流………海溝で沈み込んだプレートやその延長は地震波の高速度領域であり，マントルの下降流の一部を形成すると考えられている。

まとめ

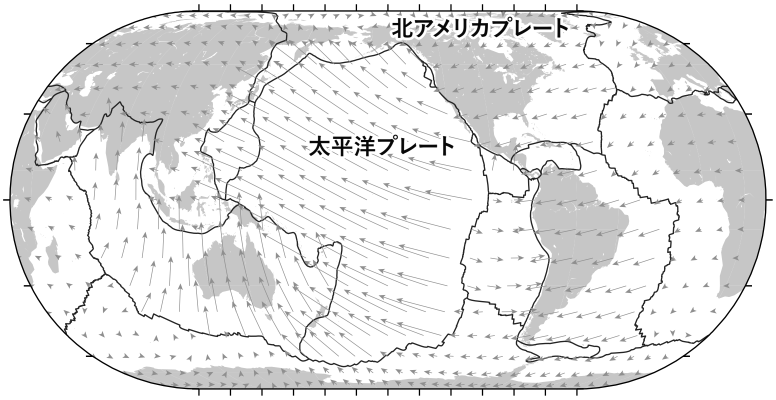
・プレート運動は球面上の回転運動とみなすことができる。
・______________________は，地下の地震波速度の 3 次元的な分布を推定する手法である。
・マントルの深部から上部まで続く地震波の低速度領域は，大規模な上昇流である__________に相当する。
・海溝で沈み込んだプレートやその延長は地震波の高速度領域であり，マントルの__________の一部を形成する。

※ Lu et al.(2019) によるデータをもとに作図

Chapter2　演習問題

ここでは，プレートの回転運動について考察してみましょう。

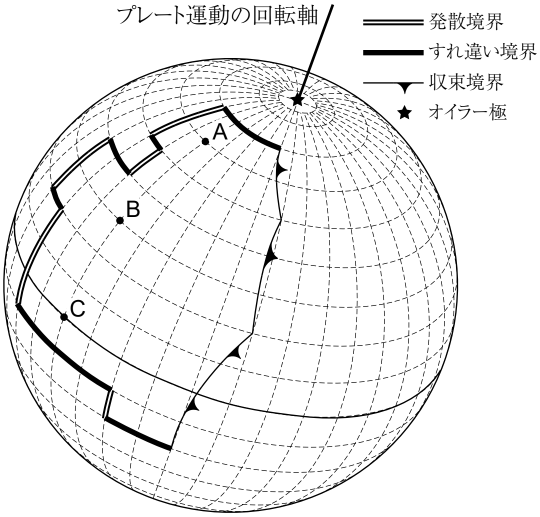
問題⑴　次の図は，地球上のプレートの移動のようすを矢印により表したものです。矢印の向きは移動の向き，矢印の長さは移動速度を表しています。この図について述べた下の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。



Gripp and Gordon (2002) のデータをもとに作図

プレートの移動速度は，同じプレートでも場所によって異なっている。たとえば，太平洋プレートの移動速度は赤道付近とくらべて北半球の中緯度の方が（大きい / 小さい）。また，北アメリカプレートの移動速度はカナダ付近とくらべてメキシコ付近の方が（大きい / 小さい）。これらのことは，プレートが（ゴムのように伸び縮みしている / 球面上を回転している）ことの結果である。

問題⑵　次の図は，仮想的なプレートについて，周囲のプレートとの境界，プレート運動の回転軸，オイラー極を示したものです。このプレートが100万年あたり1°の角速度で回転し続けていると仮定すると，図中のA，B，C地点の3000万年後の位置はどのように推定されるでしょうか。それぞれ図中に示しましょう。ただし，図中の破線は回転軸を含む円および回転軸と垂直な円であり，いずれも10°間隔で描かれています。



問題⑶　**問題⑵**の結果を参考にして，図中のA，B，C地点の3000万年間の移動距離を小さい順に答えましょう。

第 5 講　PART3　確認問題

問 1　次の文章を読み，下の問いに答えよ。

1960 年代後半から 1970 年代にかけて，プレートテクトニクスの考え方が確立していった。プレートの運動は，その下にあるマントルの（　ア　）の現れである。

プレートの運動を，地球という球面上における板の運動と考えると，a ある回転軸のまわりの回転運動とみなすことができる。

(1)　空欄アに入る語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　加速度運動　　②　落下運動
③　回転運動　　④　対流運動

(2)　下線部 a について，回転の角速度を一定としたとき，このプレートの運動の特徴として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　回転軸から遠い部分ほど移動速度が大きい。
②　回転軸から遠い部分ほど移動速度が小さい。
③　回転軸からの距離によらず移動速度は一定である。
④　回転軸からの距離と移動速度は関係がない。

問２　次の文章を読み，下の問いに答えよ。

マントルの動きは，（　イ　）という地震波速度の３次元的な分布を推定する手法により調べられており，（　ウ　）や東アフリカの地下には b 大規模な上昇流が存在すると推定されている。

(1)　空欄イに入る語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　GPS　　②　重力補正

③　地震波トモグラフィー　　④　緊急地震速報

(2)　空欄ウに入る語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　グリーンランド沖　　②　日本海溝

③　大西洋中央海嶺　　④　南太平洋

(3)　下線部ｂについて，マントルの大規模な上昇流の名称として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　プルーム　　②　ダイナモ

③　ホットスポット　　④　コロナ

第6講　地震
PART1 震源の分布

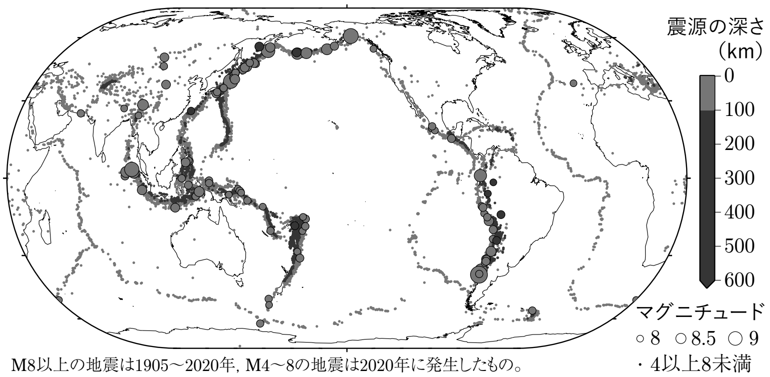
目標　深発地震面について，プレートの沈み込みと関連付けて説明できる。

Chapter1　震源の分布

　地学基礎では，震源分布がプレート運動と関係していることを学んでいます。震源分布について，少し詳しく見ていきましょう。

世界の地震

・震源の分布



M8以上の地震は1905～2020年，M4～8の地震は2020年に発生したもの。
USGSのデータをもとに作成。

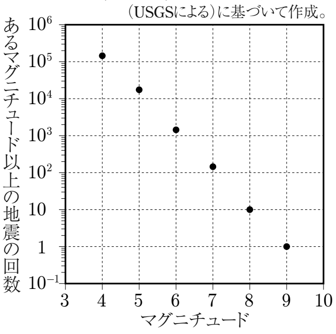
→地震の多くはプレート境界で起こっている。特に，大規模な地震の多くはプレートの（発散する / 沈み込む）境界で発生する。

・地震の規模と回数

　地震の規模はマグニチュードで表される。

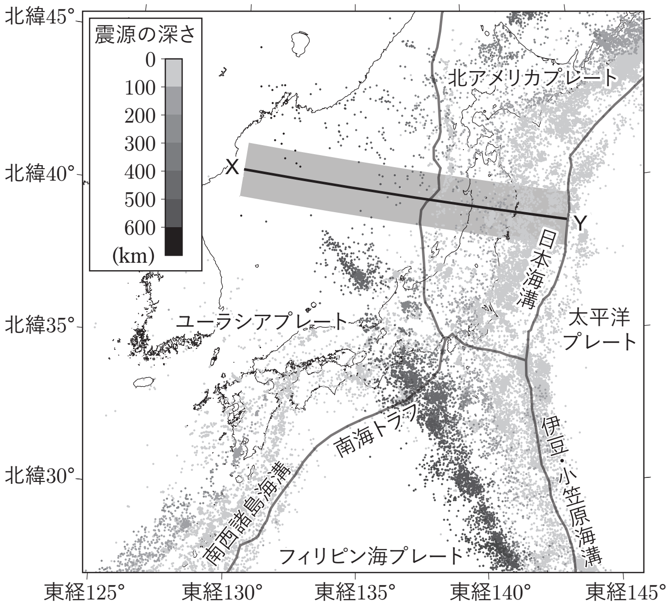
　マグニチュードが大きいほど，地震の回数は（多い / 少ない）。

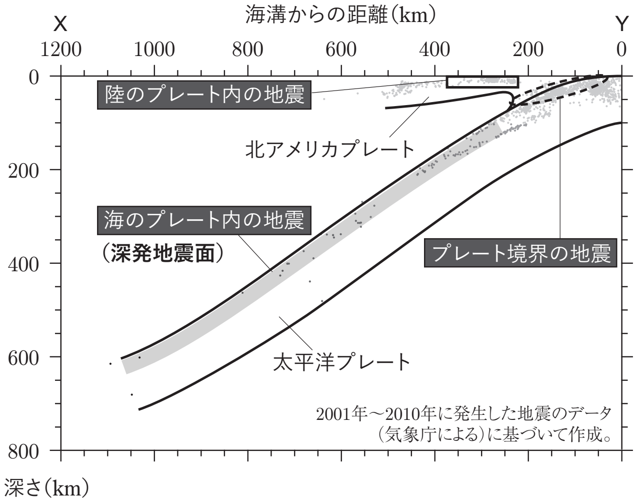
2011年～2020年に発生した地震のデータ（USGSによる）に基づいて作成。



日本の地震

・震源の分布





→深発地震の震源は，沈み込む海のプレートの上面に沿って分布する。震源の並ぶこの面を**深発地震面**〔和達－ベニオフ帯〕という。

まとめ

・日本列島の地下には，沈み込む海のプレートの上面に沿って深発地震の震源が分布する。この面は＿＿＿＿＿＿と呼ばれる。

知っておこう

1927年，和達清夫は，震源の深さが300kmを超えるような深発地震が存在することや，そのような地震の震央が若狭湾から八丈島にかけての限られた地域に分布することを報告しました。その後，彼は日本付近の深発地震の震源分布が（震源を決定できた数は少ないものの）左の図と同じようなものであることを明らかにしています。

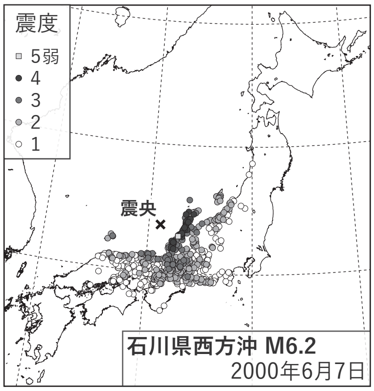
また，1949年，アメリカのベニオフ（Victor Hugo Benioff）は，南米などの海溝を研究対象として，水平面と45°前後の角をなす面上に深発地震の震源が分布することを示しました。海溝から沈み込むプレートの存在を示すこれらの研究結果は，後のプレートテクトニクスの発展に貢献しました。

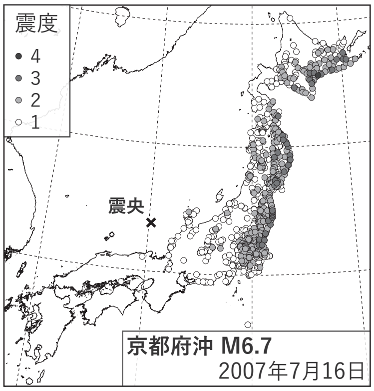
覚えておこう

深発地震とは，震源の深さが100km（または300km）を超える地震です。

Chapter2　演習問題

　次の図は，震央の隣り合った２つの地震について，観測された震度の分布を示したものです。ここでは，これらの地震をもとに，震源の深さと地震波の伝わり方の特徴について考えてみましょう。





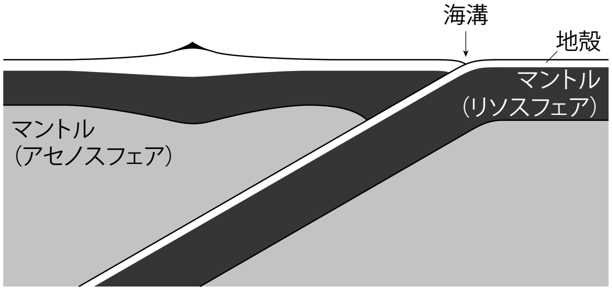
気象庁のデータをもとに作成。

問題(1)　これらの地震について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

　石川県西方沖の地震で観測された震度には，震央に近いほど（大きく / 小さく），震央から離れるほど（大きい / 小さい）という傾向がある。

　一方，京都府沖の地震で観測された震度にはそのような傾向が見られない。この地震では，震央から離れた東日本の（日本海側 / 太平洋側）で震度が大きくなっている。このように，震央から離れたところで大きな地震動を生じた地域を異常震域という。

問題⑵　次の図は，プレートの沈み込む境界の断面を模式的に表したものです。リソスフェアにあたるプレートを地震波が伝わるときは，アセノスフェアを伝わるときとくらべて地震波が弱まりにくいことが知られています。このことを踏まえて，２つの地震の震源の深さについて述べた下の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。



陸のプレート内で発生した地震の地震波は，地表までリソスフェアだけを伝わる。そのため，伝わる方向による弱まり方の違いは小さい。よって，震源に近いほど，すなわち震央に近いほど震度が大きいと考えられる。

それに対して，沈み込む海のプレートで発生した地震の地震波は，真上のアセノスフェアを通して地表へと伝わっていくとき（弱まりやすく / 弱まりにくく），沈み込む海のプレートに沿って伝わるとき（弱まりやすい / 弱まりにくい）。そのため，震源の真上にあたる震央付近では震度が（大きく / 小さく），震央から離れた海溝付近では震度が（大きい / 小さい）と考えられる。

このように考えると，２つの地震のうち石川県西方沖の地震は震源の（浅い / 深い）地震であり，京都府沖の地震は震源の（浅い / 深い）地震だと推測できる。

第 6 講　PART1　確認問題

次の文章を読み，下の問いに答えよ。

問１　地震の震源分布はプレート運動と関係している。地震の多くはプレートの境界で起こっており，とくに，マグニチュードの（　ア　）地震は，プレートの沈み込む境界で発生することが多い。地震の発生回数は，一般に，マグニチュードが（　イ　）ものほど多い。

震源の深さが（　ウ　）km を超える地震を深発地震といい，その震源は海溝から沈み込むプレートの上面に沿って分布している。深発地震の震源が分布するこの面を深発地震面または（　エ　）という。

(1)　空欄ア，イに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ア：大きな　　イ：大きい
②　ア：大きな　　イ：小さい
③　ア：小さな　　イ：大きい
④　ア：小さな　　イ：小さい

(2)　空欄ウに入る数値として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　1　　②　10　　③　100　　④　1000

(3)　空欄エに入る語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　大地溝帯　　②　モホ面
③　和達－ベニオフ帯　　④　ジオイド

＜ Note ＞

PART2 震源の決定

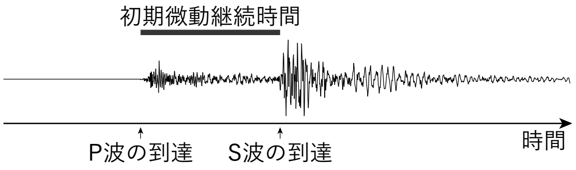
目標　地震波の観測結果をもとに震源を決定する方法について説明できる。

Chapter1　震源の決定

これまでに，地震の震源がどのように分布しているのかを学びました。そもそも，地震の震源はどのようにして決定されているのでしょうか。

震源距離に関する大森公式 地学基礎

・**初期微動継続時間**



・**大森公式**

震源距離〔震源から観測点までの距離〕を d，P 波速度を v_{P}，S 波速度を v_{S}，初期微動継続時間を t_{PS} とすると，

$$t_{\mathrm{PS}} = \frac{d}{v_{\mathrm{S}}} - \frac{d}{v_{\mathrm{P}}}$$

$$= \frac{v_{\mathrm{P}} - v_{\mathrm{S}}}{v_{\mathrm{P}} v_{\mathrm{S}}} d$$

と表せる。よって，

$$d = \frac{v_{\mathrm{P}} v_{\mathrm{S}}}{v_{\mathrm{P}} - v_{\mathrm{S}}} t_{\mathrm{PS}}$$

であり，$\dfrac{v_{\mathrm{P}} v_{\mathrm{S}}}{v_{\mathrm{P}} - v_{\mathrm{S}}} = k$ とおくと，

$$d = k t_{\mathrm{PS}}$$

と表せる（地域により異なるが，k は 8km/s 程度）。この関係式を，震源距離に関する大森公式という。

→初期微動継続時間がわかれば，震源距離を求めることができる。

知っておこう

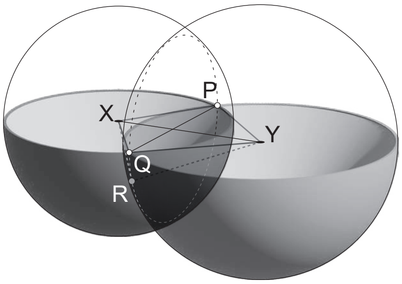
1899 年，大森房吉は，地震の初期微動継続時間が地震の規模によらず，震源距離のみによって決まることを観測データから示しました。また，それを速度の異なる２つの地震波が存在すると考えることで左のように説明しました。

なお，左に「震源に関する大森公式」と書かれているのは，「余震に関する大森公式」も存在するからです。こちらは高校地学では扱われませんが，時間とともに余震の頻度が減っていくようすを表す公式です。

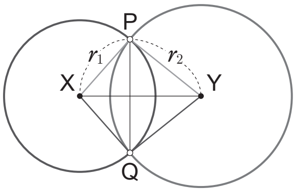
震源の決定

・震央の決定

3次元空間



地表面での位置関係

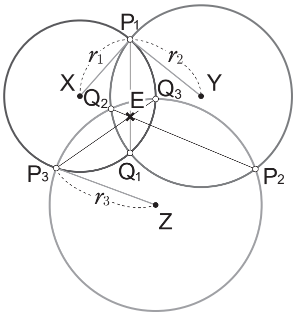


X からの距離が r_1 で，Y からの距離が r_2 である点は，図の２つの球の交線にあたる円周上（たとえば R）にある。

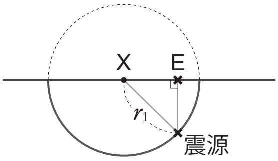
→震央〔地表面で見たときの震源〕は，線分 PQ 上にある。

・震源の決定

地表面での位置関係



XEを通る断面での位置関係



X，Y，Z の震源距離が r_1，r_2，r_3 であるとき，震央 E は線分 P_1Q_1，P_2Q_2，P_3Q_3 の交点にあたる。

→震源は E の真下にあり，X を中心とする半径 r_1 の球上の点である。

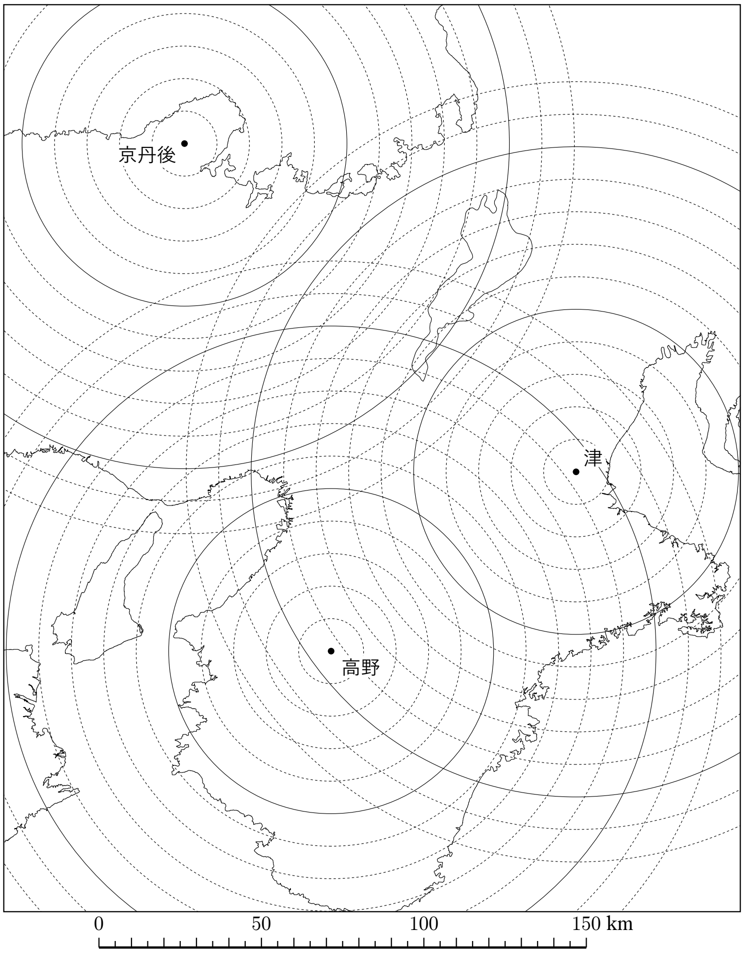
まとめ

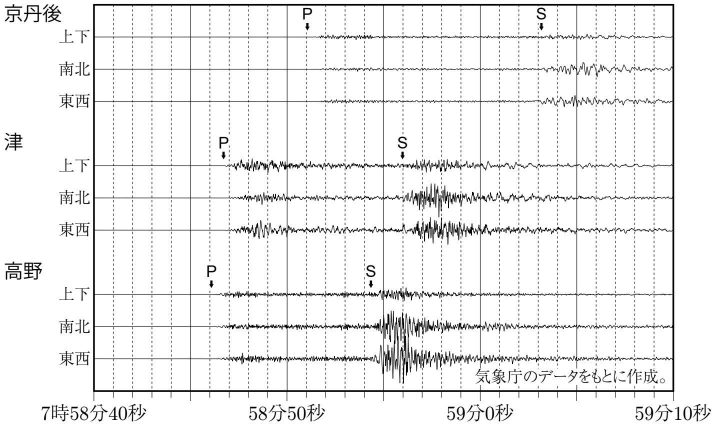
・震源距離は，＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿をもとに，大森公式を用いて求めることができる。

・＿＿個の観測地点で震源距離を求めることにより，震源を決定することができる。

Chapter2　演習問題

次の図は，ある地震を観測した京丹後（たんご），津，高野（こうや）の位置と，それらの地点での地震波形を示したものです。ここでは，この地震の震央を推定してみましょう。





問題(1)　この図の範囲において，大森公式の定数は 8.4km/s としてよいものとします。図と大森公式を用いて，次の表の空欄を埋めてください。ただし，地震波形の図の P と S の位置は，それぞれの地震波の到達した時刻を表します。時刻は 0.1 秒単位まで読み取り，震源距離は上から 2 桁の概数で答えましょう。

地点	P 波の到達時刻	S 波の到達時刻	初期微動継続時間	震源距離
京丹後	58 分 51.1 秒	59 分　3.2 秒	12.1 秒	km
津	分　　秒	分　　秒	秒	km
高野	分　　秒	分　　秒	秒	km

問題(2)　**問題**(1) の結果をもとに作図を行い，この地震の震央を×印で示してください。なお，図中の円は各観測点を中心として半径 10km 刻みで描かれており，実線は半径 50km と 100km の円です。紙のテキストを利用している人はコンパスを用いてもよいでしょう。

第 6 講　PART2　確認問題

問 1　震源距離に関する大森公式について，次の各問いに答えよ。

(1)　初期微動継続時間の説明として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　地震発生から P 波が到達するまでの時間

②　地震発生から S 波が到達するまでの時間

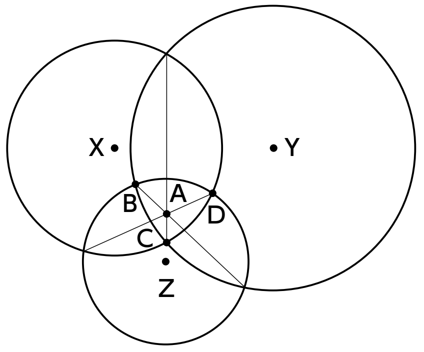
③　P 波が到達してから S 波が到達するまでの時間

④　S 波が到達してから地震のゆれが止まるまでの時間

(2)　震源距離を d，初期微動継続時間を t とするとき，大森公式を表す式として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。ただし，k は定数とする。

①　$d = kt$　②　$d = kt^2$　③　$d = \frac{k}{t}$　④　$d = \frac{k}{t^2}$

問 2　地表面の 3 地点 X，Y，Z で同じ地震を観測した。地表面上に，図のように X，Y，Z を中心としてそれぞれの震源距離を半径とする円を考える。このとき，この地震の震源はどこにあるか。最も適当なものを，下の①～④のうちから一つ選べ。



①　A の真下　②　B の真下

③　C の真下　④　D の真下

＜ Note ＞

PART3 発震機構

目標　横ずれ断層のずれとP波初動の押し引き分布との対応関係について説明できる。

Chapter1　発震機構

地学基礎では，力のかかり方と断層のずれとの関係について学びました。ここでは，その力のかかり方がどのようにして推定されるのかを考えてみましょう。

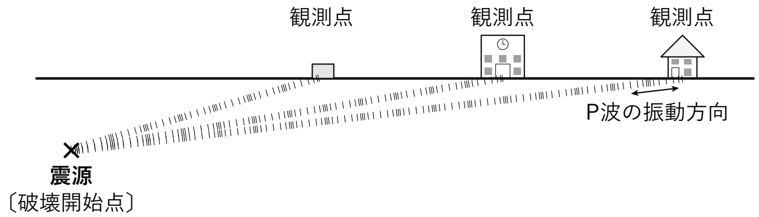
発震機構

・**発震機構とは**

震源断層の方向やずれ方のこと。

・**P波の伝わり方と初動**

最初に観測されるP波をP波初動という。



→P波の振動方向は波の進行方向と平行であり，P波初動は震源が観測点を押すか引くかのどちらかになる。押し引きは，地震波の（上下動 / 南北動 / 東西動）成分から判断できる。

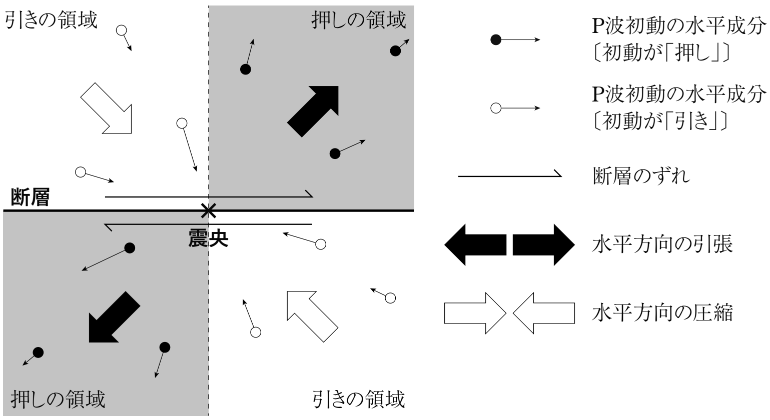
知ってておこう

地震動は3次元空間での動きであり，地震計はその動きを上下動，南北動，東西動の3成分に分けて測定・記録しています。

・**初動の押し引き分布と発震機構**

P 波初動が観測点を押した領域を「押し」,引いた領域を「引き」と表す。

たとえば，震源が地表付近にあって断層面が鉛直な右横ずれ断層では,震央で直交する 2 直線によって「押し」と「引き」の領域が分かれた P 波初動の押し引き分布がみられる。



→ P 波初動の押し引き分布から，発震機構や震源への力のかかり方を推定することができる。

知っておこう

断層の向きが分かっていないとき，押し引き分布だけから発震機構を 1 通りに決めることはできません。このことについては，演習問題で扱います。

まとめ

・P 波の振動方向は，進行方向と________である。

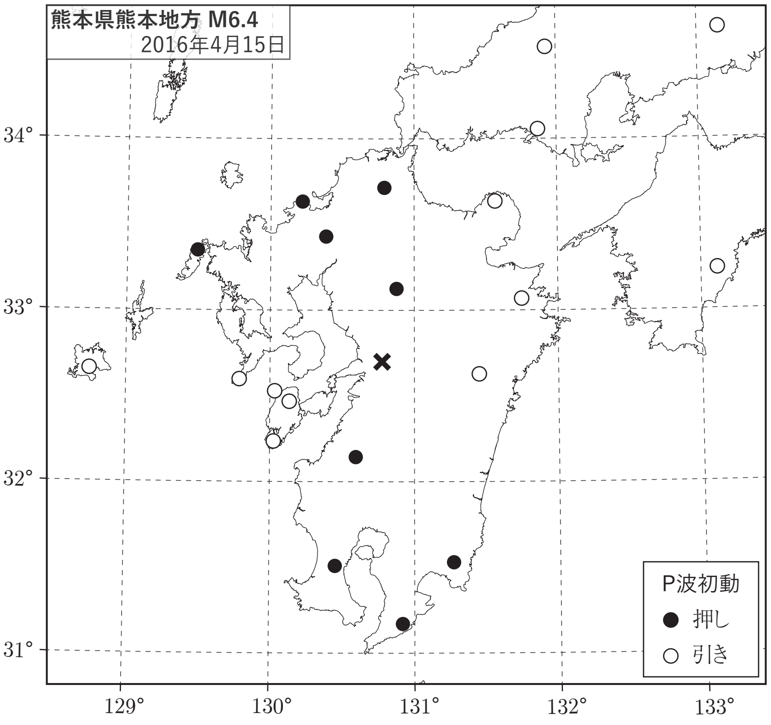
・P 波初動の________成分から，P 波初動の押し引き分布を調べることができる。

・P 波初動の押し引き分布から，発震機構や震源への力のかかり方を推定することができる。

Chapter2　演習問題

次の図は，×印の位置を震央とする地震〔以下，地震 E とします〕について，周辺の観測点における P 波初動の押し引き分布を示したものです。ここでは，地震 E の発震機構について考えてみましょう。

気象庁,九州大学,高知大学の観測データをもとに作成。



問題⑴　地震 E は震源の深さが 7km であり，図のようなスケールでは地表付近の地震とみなすことができます。地震 E が鉛直な横ずれ断層によって引き起こされたと仮定すると，P 波初動の押し引き分布は震央で直交する 2 直線によって 4 つの領域に分けることができるはずです。そのような 2 直線を，図中に描いてください。

問題⑵　**問題⑴**の結果について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

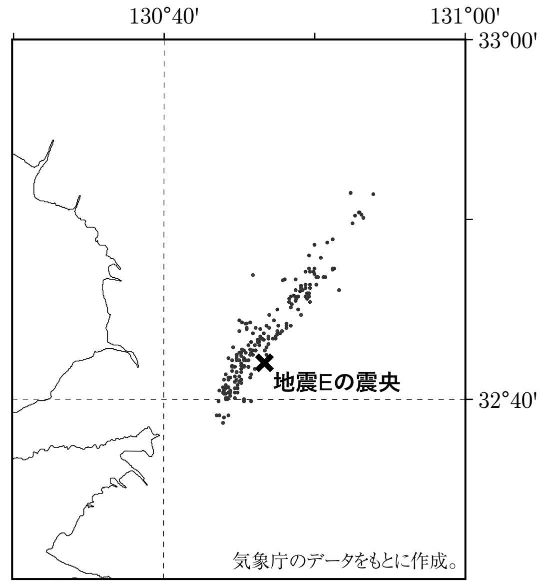
問題⑴の結果から，地震Eの震源には北北西—南南東方向の（圧縮 / 引張），西南西—東北東方向の（圧縮 / 引張）の力がかかっていたと推定できる。

また，問題⑴で描いた2直線のうち，どちらが断層面に対応するのかはこの時点で判断できない。2直線のうち南北に近いものが断層面に対応しているとすると，地震Eは（右横ずれ / 左横ずれ）断層によるものだと考えられる。それに対して，2直線のうち東西に近いものが断層面に対応しているとすると，地震Eは（右横ずれ / 左横ずれ）断層によるものだと考えられる。

問題⑶　次の図は，地震Eの発生から24時間以内に発生した地震〔ただし，震源の深さが20km以内でマグニチュードが2.5以上のもの〕の震央の分布を表しています。**問題⑴**，**問題⑵**の結果とこの図をもとにして，地震Eの発震機構，すなわち震源断層の方向とずれ方を簡潔に説明してください。

復習

震源域と余震（地学基礎）
断層運動の広がった領域を**震源域**という。大きな地震の後には震源域やその周りで多くの地震が発生し，それを**余震**という。



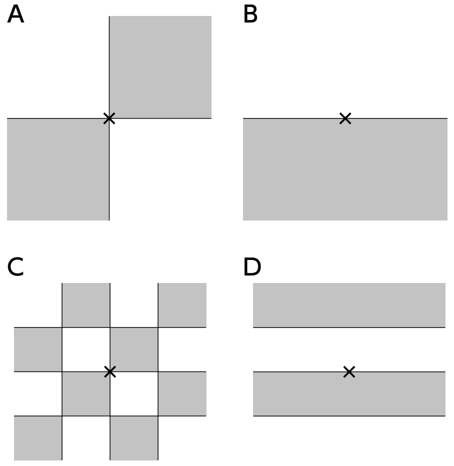
第６講　PART3　確認問題

問１　次の文章の空欄ア，イに入る語句の組合せとして最も適当なものを，下の①～④のうちから一つ選べ。

最初に観測される P 波を P 波初動という。P 波の振動方向は波の進行方向と（　ア　）であり，観測点におけるＰ波初動は，震源から観測点を押す向きか，観測点を引く向きのどちらかになる。P 波初動の上下動の記録が上向きの場合は，P 波初動は（　イ　）だったとわかる。

① ア：垂直　　イ：押し
② ア：垂直　　イ：引き
③ ア：平行　　イ：押し
④ ア：平行　　イ：引き

問２　震源が地表付近にあって，断層面が鉛直な横ずれ断層の P 波初動の押し引き分布は，どのようになるか。最も適当なものを，下の①～④のうちから一つ選べ。ただし，図の×印は震央を，色の付いた領域は「押し」の領域，色の付いていない領域は「引き」の領域を表している。



① A　　② B　　③ C　　④ D

＜ Note ＞

第7講　火山

PART1 造岩鉱物の性質

目標　主要造岩鉱物の構造と固溶体について説明できる。

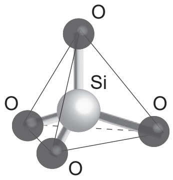
Chapter1　造岩鉱物の性質

地学基礎では，火成岩を構成するおもな鉱物が有色鉱物と無色鉱物に分類できることを学んでいます。これらの鉱物について，少し詳しく見ていきましょう。

主要造岩鉱物の構造

・ケイ酸塩鉱物 地学基礎

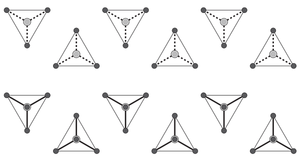
火成岩を構成する鉱物〔造岩鉱物〕の多くは，Si のまわりに O が 4 つ結びついた SiO_4 四面体が基本となっている。このような鉱物を**ケイ酸塩鉱物**という。



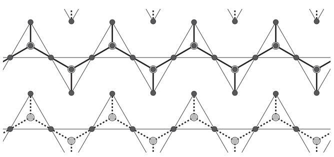
・有色鉱物の構造

Mg や Fe を含み，黒っぽく見える鉱物を**有色鉱物**という。有色鉱物は，その骨格における SiO_4 四面体どうしの結びつき方でさらに細かく分類されている。

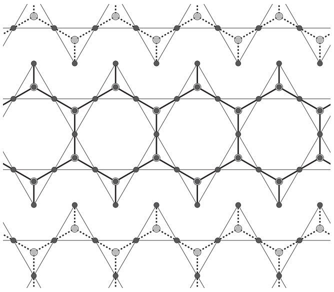
かんらん石（四面体が独立）



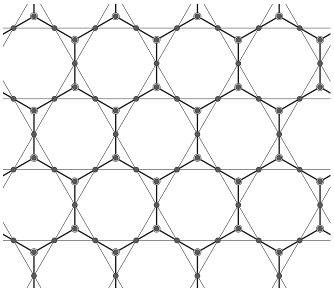
輝石（四面体が一本鎖状）



角閃石（四面体が二重鎖状）



黒雲母（四面体が平面網目状）



・**無色鉱物の構造**

Mg や Fe を含まず，白っぽく見える鉱物を**無色鉱物**という。無色鉱物は，SiO_4 四面体どうしが（立体的に / 平面状に）結びついたものが骨格となっている。

固溶体

・**固溶体**

結晶構造は同じでも，化学組成が異なる鉱物を**固溶体**という。

→価数が同じで半径もほぼ同じイオンどうしは入れ替わりやすい。主要造岩鉱物のうち（黒雲母 / 石英）以外は固溶体の性質をもつ。

まとめ

・造岩鉱物の多くは＿＿＿＿四面体を基本とする鉱物であり，このような鉱物を＿＿＿＿＿＿＿＿という。

・有色鉱物の四面体どうしのつながりは，

かんらん石……＿＿＿＿している

輝石……………＿＿＿＿＿＿状

角閃石…………＿＿＿＿＿＿状

黒雲母…………＿＿＿＿＿＿状

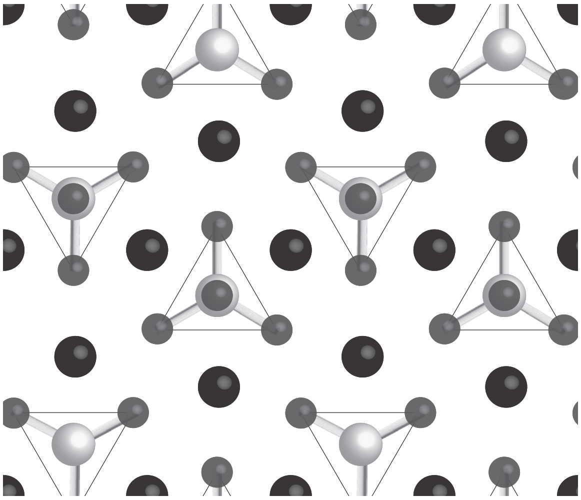
である。

・結晶構造は同じで化学組成が異なる鉱物を＿＿＿＿＿という。

Chapter2　演習問題

ここでは，有色鉱物の構造について確認しましょう。

問題⑴　次の図は，ある方向からかんらん石の結晶を見た模式図です。この図について述べた下の文章中の(　　)について，正しいものを選びましょう。



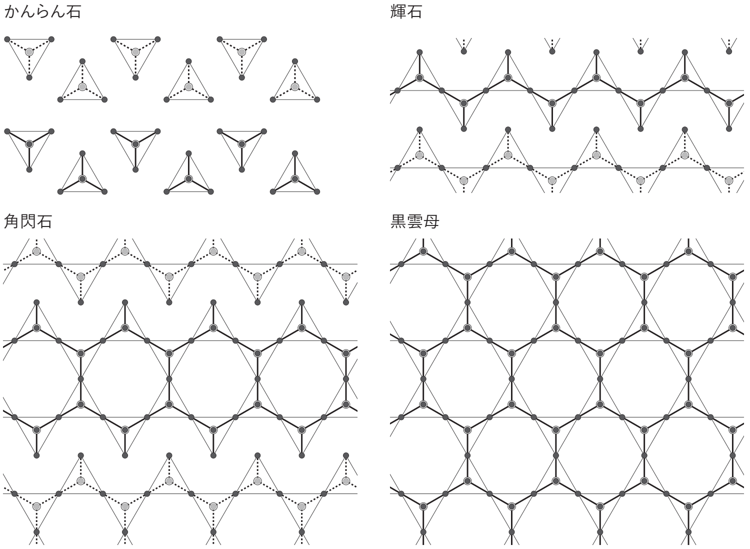
図に三角形で示されているものは，SiO_4 四面体を表している。図のように，かんらん石の SiO_4 四面体はそれぞれが独立している。

ここで，Si は4価の陽イオン Si^{4+} になり，O は2価の陰イオン O^{2-} になる。このことから，SiO_4 は電気的に中性でなく，(SiO_4^{4+} ／ SiO_4^{4-}) と表せることがわかる。

図に SiO_4 四面体から離れた黒丸として描かれているものは，Mg^{2+} や Fe^{2+} などの陽イオンである。かんらん石の結晶には SiO_4 四面体1個に対してこれらのイオンが (1個 ／ 2個 ／ 4個) 入っているため，結晶全体では電気的に中性となっている。

また，Mg^{2+} と Fe^{2+} は互いに価数が等しく，イオン半径も近い。そのため，かんらん石には Mg^{2+} と Fe^{2+} がさまざまな比率で含まれる。このように，結晶構造が同じでも化学組成が異なる鉱物を (固溶体 / ケイ酸塩鉱物) という。

問題⑵　次の図は，代表的な有色鉱物の結晶の骨格を模式的に表したものです。この図について述べた下の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。



有色鉱物の SiO_4 四面体どうしの結びつき方には，いくつかのパターンがある。ここでは，１つの SiO_4 四面体のもつ４つの O のうち，いくつの O が他の四面体と共有されているかを考えてみよう。

かんらん石は SiO_4 四面体が独立しており，O を１つも他の四面体と共有していない。輝石は，どの四面体についても（1 つ / 2 つ）の O を他の四面体と共有している。角閃石の場合は共有する O の個数が四面体によって異なり，（1 つまたは 2 つ / 2 つまたは 3 つ）の O を他の四面体と共有している。黒雲母は，どの四面体についても（3 つ / 4 つ）の O を他の四面体と共有している。

このように考えると，4 つの有色鉱物のうち SiO_4 四面体どうしの結びつきが最も弱いものは（かんらん石 / 輝石 / 角閃石 / 黒雲母）であり，最も強いものは（かんらん石 / 輝石 / 角閃石 / 黒雲母）であるといえる。

第7講　PART1　確認問題

問１　次の各問いに答えよ。

(1)　有色鉱物に多く含まれる成分元素として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　Mg，Fe　　②　Na，Al
③　K，Ca　　④　Ni，Mn

(2)　有色鉱物のうち，SiO_4 四面体が独立した構造をしているものとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　角閃石　　②　黒雲母
③　輝石　　④　かんらん石

(3)　固溶体の説明として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　化学組成も結晶構造も異なる鉱物
②　化学組成も結晶構造も同じ鉱物
③　化学組成が同じで，結晶構造が異なる鉱物
④　結晶構造が同じで，化学組成が異なる鉱物

(4)　主要造岩鉱物のうち，固溶体をもたない鉱物として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　かんらん石　　②　石英
③　輝石　　④　黒雲母

＜ Note ＞

PART2 マグマの発生

目標　マントル物質の部分溶融を起こす３つの過程を挙げ，プレート境界で部分溶融の起こる原因について説明できる。

Chapter1　マグマの発生

地球の地殻やマントルは固体であり，マグマが発生している場所は限られています。ここでは，マグマの発生する過程についてみていきましょう。

マントル物質の部分溶融

・**部分溶融**

氷は H_2O だけからなる純物質である。1 気圧の条件で純粋な氷を温めると，0℃で融け始めて，0℃のまま全体が融け終わる。このとき，液体になるものはつねに純粋な水である。

それに対して，岩石は融点の異なるさまざまな鉱物の混合物であり，その中には溶融しやすい成分と溶融しにくい成分がある。そのため，岩石の温度を上げていくと，溶融しやすい成分から少しずつ融け始め，完全に融けるまでの間にも温度が上昇していく。また，液体の成分も変化していく。

実際の地下の条件では，マグマが発生している場所でも岩石全体のうち（数％程度 ／ 約 50%）しか融けていないと考えられている。このように，岩石の一部が融けることを**部分溶融**という。

マントルのかんらん岩〔超苦鉄質岩〕が部分溶融すると，それよりも SiO_2 の割合がやや（高い ／ 低い）玄武岩質〔苦鉄質〕のマグマが形成される。

・**部分溶融の原因**

多くの鉱物について，圧力が高いほど融点は高い。そのため，岩石の融け始める温度は，地下深くなるほど（高い ／ 低い）。

また，かんらん岩の融け始める温度は，水を含むことで（高

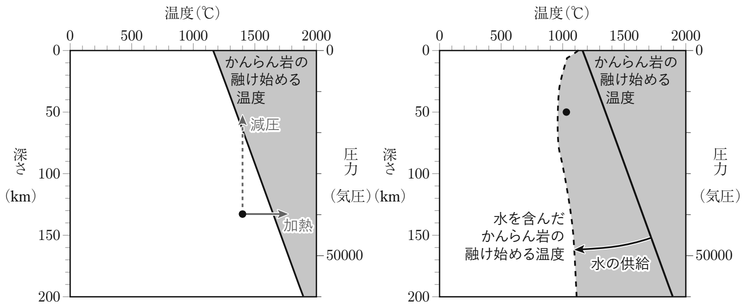
復習

火成岩の分類（地学基礎）
火成岩は，斑状組織をもつ**火山岩**と等粒状組織をもつ**深成岩**に分けられる。

SiO_2	少	→	多	
	苦鉄質	中間質	ケイ長質	
火山岩	玄武岩	安山岩	デイサイト	流紋岩
深成岩	斑れい岩	閃緑岩	花こう岩	

上部マントルは，苦鉄質岩よりもさらに SiO_2 の少ない〔超苦鉄質の〕かんらん岩からなる。

く／低く）なることが知られている。



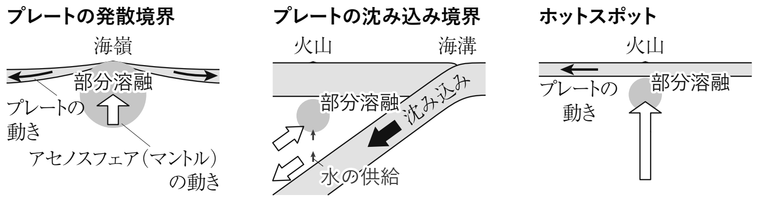
→左の図のようにかんらん岩を温める〔加熱する〕，浅いところに動かす〔減圧する〕，あるいは，右の図のようにかんらん岩に水を供給すると，●のかんらん岩の部分溶融が起こる。

・**部分溶融の起こる場所**

プレートの発散境界………海嶺直下のマントル物質が上昇し，減圧される。

プレートの沈み込み境界…マントル物質が上昇して，減圧が起こる。また，沈み込むプレートの含水鉱物が分解され，上部のマントルに水が供給される。

ホットスポット……………マントル物質が上昇し，減圧される。



まとめ

・マントルのかんらん岩が部分溶融すると，＿＿＿＿岩質のマグマが発生する。

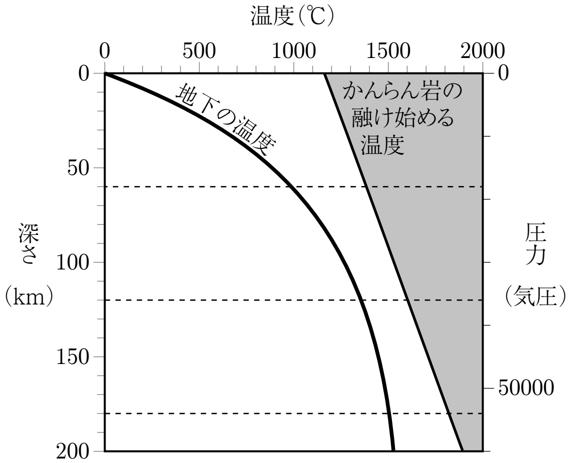
・かんらん岩の部分溶融は，温度を上げること，圧力を下げること，＿＿＿を供給することで起こる。

・部分溶融のおもな原因は，プレートの発散境界では減圧，沈み込み境界では＿＿＿＿と＿＿＿＿＿＿＿である。

Chapter2　演習問題

ここでは，マグマの発生しやすいのはどのような場所なのか，グラフを用いて大まかに見積もってみましょう。

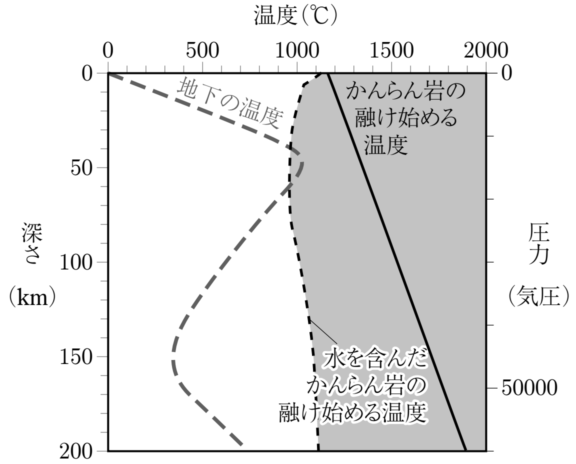
問題(1)　次の図は，海嶺付近の地下の温度と，かんらん岩の融け始める温度を表しています。減圧によるマグマの発生について述べた下の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。



海嶺では，おもに減圧によってマグマが発生している。ここでは，減圧のみによってかんらん岩の部分溶融が起こると考えよう。

上の図をもとに考えると，上昇を始めてから部分溶融が起こるまでの深さの変化量が最も小さいのは，元の深さがおよそ（60 ／ 120 ／ 180）km のときである。このとき，かんらん岩は深さおよそ（50 ／ 100 ／ 150）km の地点で部分溶融を開始する。

問題⑵　次の図は，プレートの沈み込み境界における地下の温度と，かんらん岩の融け始める温度を表しています。プレートの沈み込み境界におけるマグマの発生について述べた下の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。



プレートの沈み込み境界では，地下の温度分布が他の地域とは大きく異なっている。これは，沈み込むプレートが周囲のアセノスフェアとくらべて（温かい ／ 冷たい）からである。上の図では，沈み込むプレートが深さ（50 ／ 150）km 付近に存在すると推定できる。

プレートの沈み込み境界におけるマグマの発生には，減圧と水の供給の両方が関係していると考えられている。ここでは，簡単のために水の供給だけでマグマが発生すると仮定しよう。このとき，水を含んでいなかったかんらん岩に水が供給されて部分溶融が起こるのは，深さ（50 ／ 150）km 付近だと考えられる。

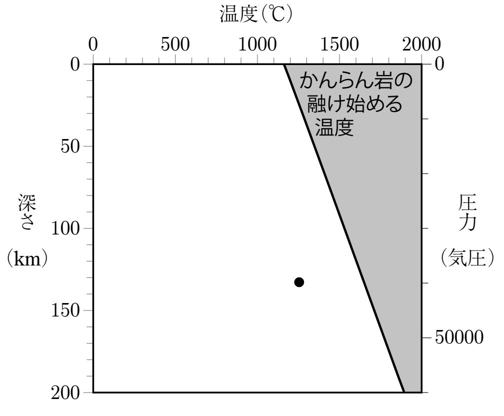
第7講　PART2　確認問題

問１　マグマができる過程を説明した次の文章の空欄ア～ウに入る語句の組合せとして最も適当なものを，下の①～④のうちから一つ選べ。

岩石は融点の異なるさまざまな鉱物の混合物であるから，岩石の温度が上がっていくと，融点の低い成分から融け始める。実際の地下の条件では，マグマが発生している場所でも岩石全体のうち数％程度しか融けていないと考えられている。このように,岩石の一部が融けることを（　ア　）という。マントルの（　イ　）が（　ア　）すると，それよりも SiO_2 の割合がやや高い（　ウ　）質のマグマが形成される。

①	ア：部分溶融	イ：玄武岩	ウ：かんらん岩
②	ア：部分溶融	イ：かんらん岩	ウ：玄武岩
③	ア：変成	イ：玄武岩	ウ：かんらん岩
④	ア：変成	イ：かんらん岩	ウ：玄武岩

問２　次の図は，かんらん岩の融け始める温度と深さの関係を表したものである。図中の●のかんらん岩について，ａ～ｄのうち,部分溶融が起こる条件はどれか。最も適当なものを,次の①～④のうちから一つ選べ。



a　加熱する　　　b　冷却する
c　浅いところに動かす　　　d　深いところに動かす
①　a，c　　　②　a，d
③　b，c　　　④　b，d

問３　次の文章は部分溶融が起こる場所とおもな原因について説明したものである。空欄エ～カに入る語句の組合せとして最も適当なものを，下の①～④のうちから一つ選べ。

プレートの（　エ　）境界では，海嶺直下のマントル物質が上昇して，減圧が起こる。
プレートの（　オ　）境界では，マントル物質が上昇して，減圧が起こる。また，（　カ　）を含む鉱物が分解され，上部のマントルに（　カ　）が供給されることも部分溶融の原因となる。

①　エ：沈み込み　オ：発散　カ：鉄
②　エ：沈み込み　オ：発散　カ：水
③　エ：発散　オ：沈み込み　カ：鉄
④　エ：発散　オ：沈み込み　カ：水

PART3 マグマの性質の変化

目標　マグマの性質を変化させる３つの過程について説明できる。

Chapter1　マグマの性質の変化

地下の岩石の部分溶融によって発生したマグマは，岩石になるまでにその性質を変化させます。ここでは，その変化について見ていきましょう。

マグマの結晶分化作用

・有色鉱物の結晶化

高温の玄武岩質マグマがゆっくりと冷却されると，凝固点の（高い / 低い）鉱物から順に結晶となり始める。

典型的な結晶化の順序：

（かんらん石 / 黒雲母）→輝石→角閃石→（かんらん石 / 黒雲母）

・無色鉱物の結晶化

高温の玄武岩質マグマがゆっくりと冷却されると，斜長石の結晶化が起こり始める。斜長石は Ca を多く含むものから Na を多く含むものまで化学組成を大きく変化させる固溶体であり，温度が高いときは（Ca / Na），温度が低いときは（Ca / Na）を多く含む斜長石が結晶化する。

カリ長石や石英は，比較的（高温 / 低温）の条件で結晶化する。

・結晶分化作用

Mg や Fe の割合は，マグマとくらべて有色鉱物の方が大きい。そのため，有色鉱物の結晶化が進み，結晶化した鉱物がマグマから取り除かれることによって，マグマに含まれる Mg や Fe の割合は（増加 / 減少）していく。このように，マグマから鉱物が結晶化し，その結晶が取り除かれることでさまざまな化学組成のマグマが形成される作用をマグマの**結**

晶分化作用という。

マグマの混合と混染

・**マグマの混合**

マグマだまりや火山の火道において，マグマが他のマグマと混ざり合って両者の中間的な化学組成のマグマとなることがある。これをマグマの**混合**という。

・**マグマの混染**

マグマは高温であり，周囲の岩石を融かし込むことで化学組成が変化することがある。これをマグマの**混染**という。

まとめ

・マグマから鉱物が結晶化し，その結晶が取り除かれることでさまざまな化学組成のマグマが形成される作用をマグマの＿＿＿＿＿＿作用という。
・マグマが他のマグマと混ざり合って中間的な化学組成のマグマとなることを，マグマの＿＿＿＿という。
・マグマが周囲の岩石を融かし込むことで化学組成を変化させることを，マグマの＿＿＿＿という。

Chapter2　演習問題

ここでは，結晶分化作用についての理解を深めるために，具体的な数値を用いて計算を行ってみましょう。

問題⑴　かんらん石の化学組成について述べた次の文章中の空欄［ **ア** ］～［ **ウ** ］に入る数値を，必要であれば小数第1位を四捨五入して整数で答えましょう。ただし，原子1個あたりの質量の比を

Mg：Fe：Si：O=24：56：28：16

とします。

固溶体であるかんらん石の化学組成は，$(Mg, Fe)_2 SiO_4$ と表される。これは，1個のSiに対してMgとFeが合わせて2個存在することを表している。

ここで，簡単のために化学組成が $MgFeSiO_4$ と表せるかんらん石について考える。このかんらん石には，1個のSiに対してMgとFeが1個ずつと，Oが4個含まれている。

このかんらん石にMgが24g含まれるとき，かんらん石全体の質量は［ **ア** ］gであり，そのうち SiO_2 は［ **イ** ］gを占める。つまり，このかんらん石に占める SiO_2 の質量の割合は［ **ウ** ］%である。

問題⑵　マグマの結晶分化作用について述べた次の文章中の空欄［　エ　］～［　ク　］に入る数値を，必要であれば小数第1位を四捨五入して整数で答えましょう。ただし，空欄［　ウ　］の数値は**問題⑴**で答えた整数値とします。

かんらん岩の部分溶融によって生じるマグマは，基本的に玄武岩である。ここでは，質量比で SiO_2 を 50% 含むマグマ **A** について考える。

マグマ **A** が 1000kg あり，そこから**問題⑴**のかんらん石だけが 100kg 結晶化して取り除かれた残りのマグマをマグマ **B** とする。このとき，それぞれの部分について次の表のようにまとめられる。

	マグマ **A**	かんらん石	マグマ **B**
全体の質量	1000kg	100kg	［　カ　］kg
SiO_2 の質量	［　エ　］kg	［　オ　］kg	［　キ　］kg
SiO_2 の割合（質量比）	50%	［　ウ　］%	［　ク　］%

SiO_2 は，元のマグマに含まれる割合よりも結晶に含まれる割合の方が小さな成分である。このような成分は，残りのマグマに含まれる割合が元のマグマに含まれる割合よりも大きくなることが確認できた。

反対に，Mg や Fe のように元のマグマに含まれる割合よりも結晶に含まれる割合の方が大きな成分は，残りのマグマに含まれる割合が元のマグマに含まれる割合よりも小さくなる。

このようにして，元のマグマの化学組成が同じであったとしても，鉱物の結晶化によってさまざまな化学組成のマグマが形成される。この作用が結晶分化作用である。

第7講　PART3　確認問題

次の文章を読み，下の問いに答えよ。

問1　地下の岩石の部分溶融によって発生したマグマは，岩石になるまでにその性質を変化させる。高温の玄武岩質マグマがゆっくりと冷却されると，有色鉱物は，a凝固点の高いものから順に結晶となり始める。無色鉱物も並行して，斜長石の結晶化が起こり始める。

有色鉱物の結晶化が進むと，結晶化した鉱物がマグマから取り除かれ，マグマに含まれるMgやFeの割合は（　ア　）。このように，マグマから鉱物が結晶化し，その結晶が取り除かれることでさまざまな化学組成のマグマが形成される作用を，マグマの（　イ　）という。

(1)　下線部aについて，結晶化する順として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① 黒雲母→かんらん石→輝石→角閃石
② 黒雲母→角閃石→輝石→かんらん石
③ かんらん石→黒雲母→輝石→角閃石
④ かんらん石→輝石→角閃石→黒雲母

(2)　空欄アに入る語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① 減る　② 増える
③ 変わらない　④ 増減をくりかえす

(3)　空欄イに入る語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① 同化作用　② 結晶分化作用
③ 混染　④ 混合

＜ Note ＞

PART4 偏光顕微鏡による鉱物の観察

目標 主要なケイ酸塩鉱物の劈開，多色性，消光，干渉色のそれぞれについて，例を挙げて説明できる。

Chapter1　鉱物と偏光顕微鏡の構造

鉱物の分析を行うときには，偏光顕微鏡という特殊な顕微鏡が用いられます。ここでは，鉱物の特徴を見直すとともに，偏光顕微鏡の構造について学びましょう。

鉱物

・鉱物とは 地学基礎

結晶……原子やイオンなどの粒子が規則正しく配列している固体。

鉱物……自然界で形成された結晶。鉱物の種類ごとに粒子の並び方が異なり，それぞれに特徴的な形をもつ。

・ 劈開〔へきかい〕

結晶が一定の面に沿って割れる性質や，その割れ目を**劈開**という。ケイ酸塩鉱物の場合，SiO_4 四面体どうしの結びつきの弱い面で割れることが多い。

劈開の例：

黒雲母…平行な 1 方向〔平面網目と平行な面〕

角閃石…約 120° で交わる 2 方向

輝石……約 90° で交わる 2 方向

偏光顕微鏡

・偏光

通常の光を波としてみたとき，その振動方向は進行方向と垂直な面内ではさまざまな方向を向いている。このうち，ある 1 つの面内で振動する光だけを取り出したものを**偏光**という。

・**偏光顕微鏡**

光源とステージの間に固定された1枚の偏光板〔下方ニコル〕を入れ，プレパラートに入る光を偏光にした顕微鏡を**偏光顕微鏡**という。

偏光顕微鏡には，対物レンズから接眼レンズまでの間に出し入れ可能なもう1枚の偏光板〔上方ニコル〕が備えられている。上方ニコルの偏光の向きは下方ニコルと直交するように設定されており，上方ニコルを用いない観察を**開放ニコル**，上方ニコルを用いる観察を**直交ニコル**という。

・**偏光顕微鏡で観察する試料**

偏光顕微鏡の観察は，鉱物が（反射 / 透過）する光を用いた観察である。岩石試料をスライドグラスに貼り付けて研磨して，岩石部分が約（30 μm / 3mm）程度の一定の厚さになるようにする。この試料を岩石薄片〔または単に薄片〕という。

まとめ

・結晶が一定の面に沿って割れる性質を_______という。

・輝石では約______°，角閃石では約______°に交わる2方向の劈開が見られる。

Chapter2　偏光顕微鏡による鉱物の観察

ここでは，偏光顕微鏡で鉱物のどのような特徴がわかるのかについて学びましょう。

開放ニコルでの観察

・鉱物の色と多色性

鉱物を光が通過するとき，一部が吸収される。一般に，吸収の強さは結晶に対する光の振動方向によって異なる。また，一部の鉱物では吸収の強さが光の色〔波長〕によっても異なり，これによって鉱物が色付いて見える。

入射光の色	波長によらず同じ程度だけ吸収される場合	赤色光が他の色の光より強く吸収される場合
赤色〔特定の波長〕	明るさが変化〔暗く見える〕	明るさが変化〔暗く見える〕
白色〔さまざまな波長〕	明るさが変化〔暗く見える〕	色が変化〔青っぽく見える〕

白色光の偏光を入射光としてステージを回転させながら開放ニコルで観察すると，鉱物の結晶と光の振動方向との関係が変化する。このときに見られる色の変化を**多色性**という。

多色性は，かんらん石以外の有色鉱物で見られる。

直交ニコルでの観察

・光学的異方性

多くの鉱物は，結晶と光の振動方向との関係によって光の伝わる速さが異なる。この性質を光学的異方性という。

光学的異方性をもつ鉱物に偏光が入射すると，直交する２つの方向の偏光に分かれる。

・消光

白色光の偏光を入射光としてステージを回転させながら直交ニコルで観察すると，鉱物の結晶と光の振動方向との関係が変化し，上方ニコルを通過する光の強さが 90°周期で変化する。

鉱物がほぼ真っ暗に見える状態を**消光**という。鉱物の劈開や長辺の方向と消光する向きとの関係が鉱物によって異なるほか，石英は（波状消光／縞状消光），斜長石は（波状消光／縞状消光）を示すことがある。

・**干渉色**

光学的異方性をもつ鉱物に偏光が入射したとき，分かれた２つの偏光は速度が異なり，鉱物から出たときには光の波にずれが生じる。２つの偏光が上方ニコルを通るとき，波長によって強め合ったり弱め合ったりする。その結果として見える直交ニコルでの鉱物の色を**干渉色**という。

干渉色は，同じ鉱物でも薄片上での向きによって色が異なる。無色鉱物の干渉色はつねに灰色であり，有色鉱物の干渉色は灰色のものもあるが鮮やかな色となることもある。

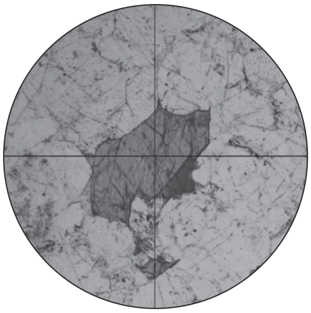
まとめ

・ステージを回転させながら開放ニコルで観察したとき，鉱物の色が変わって見える性質を＿＿＿＿＿という。この性質は，有色鉱物のうち＿＿＿＿＿＿以外でみられる。
・ステージを回転させながら直交ニコルで観察したとき，鉱物がほぼ真っ暗に見える状態を＿＿＿＿という。この状態は，ステージを＿＿＿°回転させるごとに観察される。
・直交ニコルで見える鉱物の色を＿＿＿＿という。無色鉱物ではつねに灰色だが，有色鉱物では鮮やかな色となることもある。

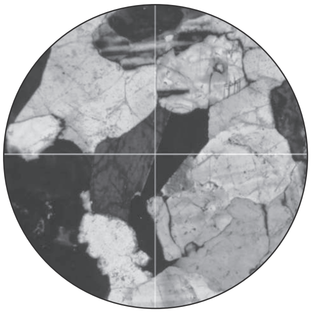
Chapter3　演習問題

次の図は，ある火成岩の薄片を偏光顕微鏡で観察して得られた写真〔視野の直径は約 1.2mm〕です。この図を例にして，偏光顕微鏡の観察からわかることについて確認しましょう。

a



b



問題⑴　a と b は，それぞれ同じ薄片の開放ニコルと直交ニコルで得られた写真です。劈開のようすをもとに推定すると，これらの写真の十字線の真下にある鉱物は何でしょうか。

問題⑵　開放ニコルの状態でステージを回転させると，a で色づいて見える鉱物は薄い緑色から暗い緑色を示しながら色を変化させました。鉱物のもつこのような性質を何と呼ぶでしょうか。

問題⑶ a では白く見える部分のうち上の方などには，b で見ると白黒の縞模様をもつ鉱物があることがわかります。この鉱物は何でしょうか。

問題⑷ 含まれる鉱物と組織をもとに推定すると，この岩石は何でしょうか。可能性のある名前を２つ挙げましょう。

ここがPOINT

火成岩の分類を行うときは，
・火山岩か深成岩か
・苦鉄質～ケイ長質のどれか
に注意します。
　自信のない人は，地学基礎の火成岩の分類を復習しておきましょう。

第7講 PART4 確認問題

次の文章を読み，下の問いに答えよ。

問1 結晶とは原子やイオンなどの粒子が規則正しく配列している固体である。自然界で形成された結晶のことを（ ア ）といい，その種類ごとに粒子の並び方が異なり，それぞれに特徴的な形をもつ。結晶が一定の面に沿って割れる性質や，その割れ目を（ イ ）という。代表的な例として，（ ウ ）は平行な1方向に割れ，（ エ ）は約120°で交わる2方向で割れる。

(1) 空欄アに入る語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① 薄片 ② 鉱物
③ 偏光 ④ 劈開

(2) 空欄イに入る語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① 薄片 ② 鉱物
③ 偏光 ④ 劈開

(3) 空欄ウ，エに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① ウ：角閃石 エ：輝石
② ウ：角閃石 エ：黒雲母
③ ウ：黒雲母 エ：角閃石
④ ウ：黒雲母 エ：輝石

問２　偏光顕微鏡でのケイ酸塩鉱物の観察について，次の問いに答えよ。

⑴　開放ニコルでの観察でのみ見られる現象として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　多色性　　②　劈開

③　干渉色　　④　消光

⑵　多色性が見られない有色鉱物として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　黒雲母　　②　輝石

③　石英　　④　かんらん石

⑶　干渉色についての記述として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　同じ種類の鉱物でも条件により色が異なる。

②　無色鉱物では干渉色は見られない。

③　有色鉱物では必ず鮮やかな色が見られる。

④　光学的異方性をもたない鉱物で見られる。

第 8 講　造山運動
PART1 地殻変動の測定

目標　地殻変動の測定方法について，例を挙げて説明できる。

Chapter1　地殻変動の測定

日本列島は，世界的にみても地殻変動の大きな場所の一つです。ここでは，地殻変動がどのように測定されているのかを見ていきましょう。

電波を用いた地殻変動の測定

・GNSS

軌道のわかっている複数の人工衛星からの電波を受信することで，受信機の位置を決定する〔測位する〕ことができる。このような測位を目的として構築された人工衛星システムの総称を **GNSS** (Global Navigation Satellite System) という。

知っておこう

全球的に利用できる代表的な GNSS としては，米国の GPS とロシアの GLONASS が挙げられます。また，日本の準天頂衛星「みちびき」は，これらのシステムを補完して日本付近の測位精度を上げるために打ち上げられたものです。

・VLBI

遠方にある天体からの電波を受信し，その波形をもとに地点ごとの到着時刻の差を調べることで，測定点の間の位置関係を調べることができる。この手法を **VLBI** (Very Long Baseline Interferometry) という。

・GNSS や VLBI の利用

GNSS や VLBI は，いずれも 1980 年代以降に発展した。これらを用いることで，地震前後の急激な地殻変動や，過去数年～ 40 年間の地殻変動のようすを測定することができる。

日本における測量

・**三角測量**

三角形を組み合わせた網目を構築することで三角形の頂点〔三角点〕の水平方向の位置を決定する方法を**三角測量**という。

・**水準測量**

2地点間の標高差の測定をくり返すことでそれぞれの地点〔水準点〕の標高を決定する方法を**水準測量**という。

・**三角測量と水準測量の利用**

日本における三角測量と水準測量は，100年を超える歴史をもつ。この間にくり返し行われた測量の成果から，数十年～百数十年間にわたる長期的な地殻変動のようすを知ることができる。

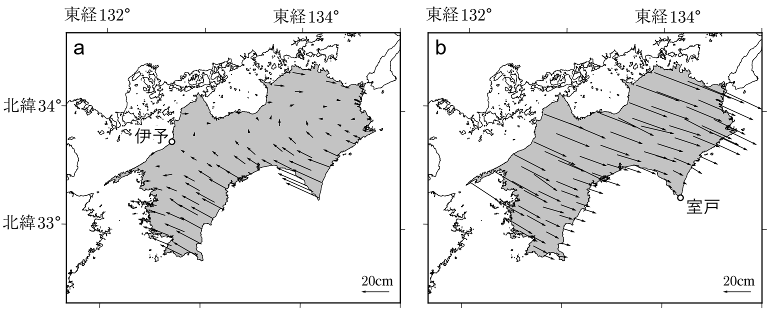
まとめ

・電波を用いた地殻変動の測定方法として，人工衛星からの電波を用いたGPSをはじめとする________や，天体からの電波を用いた________がある。

・日本では，100年以上にわたって測量が行われている。このうち，水平方向の位置を決定する方法を________，標高を決定する方法を________という。

Chapter2　演習問題

次の図は，2023 年 2 月までの 10 年間における四国の地殻変動〔水平成分〕を示したものです。この図を例にして，地殻変動データの読み取りについて確認しましょう。



（国土地理院の電子基準点データをもとに作成）

問題⑴　電子基準点について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

電子基準点は，軌道のわかっている人工衛星からの電波を受信することによって連続的に測位を行っている観測点である。このような測位を目的として構築された人工衛星システムを総称して（GPS / GNSS / VLBI）という。

問題⑵ 前ページの図について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

a は，四国の北西部に位置する伊予を基準とした他の地点の地殻変動を示している。全体的に見て（東南東 / 西北西）に移動している地点が多く，移動量は最大で（数十 m / 数十 cm）程度である。

また，b は，四国の南東部に位置する室戸を基準とした他の地点の地殻変動を示している。全体的に見て（東南東 / 西北西）に移動している地点が多く，移動量は最大で（数十 m / 数十 cm）程度である。

このように，同じ期間，同じ地域の地殻変動について描いた図であっても，基準とした地点が違えば見え方が大きく異なることがある。どちらの図をもとに考えても，2023 年 2 月までの 10 年間に, 四国は東南東－西北西方向に（伸長 / 短縮）していることが読み取れる。

第8講　PART1　確認問題

問1　次の各問いに答えよ。

(1)　測位のために構築された人工衛星システムの総称として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　GNSS　　②　GPS

③　GLONASS　　④　VLBI

(2)　遠方にある天体からの電波を受信し，その波形をもとに地点ごとの到着時刻の差を調べることで，測定点の間の位置関係を調べることができる。この手法として適当なものを，①～④のうちから一つ選べ。

①　GNSS　　②　GPS

③　GLONASS　　④　VLBI

(3)　日本における三角測量と水準測量は，それぞれ何を決定する方法か。最も適当な組合せを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　三角測量…水平方向の位置　　水準測量…重力

②　三角測量…水平方向の位置　　水準測量…標高

③　三角測量…重力　　水準測量…水平方向の位置

④　三角測量…標高　　水準測量…水平方向の位置

＜ Note ＞

PART2 地殻変動と地形

目標　地殻変動の影響を受けて形成される地形について，例を挙げて説明できる。

Chapter1　地質構造の発達と地形

地殻変動の影響で，特徴的な地形が形成されることがあります。どのような地形が形成されるのか，形成過程と関連付けて確認していきましょう。

地質構造の発達と地形

・**断層地形**

正断層，逆断層……山地や盆地，滝

横ずれ断層…………河川や尾根の屈曲

・**褶曲地形**

褶曲は地層の波打つような構造だが，それに対応するように地形の尾根と谷も形成されることがある。

地殻変動と海面の高さの変動によって形成される地形

・**相対的海水準の変動と地形形成**

侵食と堆積といった地形形成の基準面は海面である。

→隆起は海面の（上昇 / 低下），沈降は海面の（上昇 / 低下）と同じような意味をもつ。

→第四紀には氷期と間氷期がくり返され，氷期に海面の（上昇 / 低下），間氷期に（上昇 / 低下）が起こった。これにより海面の高さは最大で（1 ～ 1.5m / 100 ～ 150m）程度変化し，地形形成には地殻変動と海面の高さの変動による相対的海水準〔見かけの海面の高さ〕の変動が重要な役割を果たしてきた。

知っておこう

水深 100m 程度までの，傾斜の緩やかな海底を大陸棚と呼びます。大陸棚の多くは，最終氷期に形成された海岸沿いの平野部が，完新世の海水準変動によって海面下に沈んだものだと考えられています。

・段丘

相対的海水準の（上昇 ／ 低下）によって形成される，階段状の平坦面。長期的に（隆起 ／ 沈降）を続けている地域に形成されやすい。

名称	もととなった平坦面
海岸段丘	海食台〔海面下に形成される平坦面〕
河岸段丘	谷底平野〔河川の堆積物で谷が埋められた平野〕

・リアス海岸

相対的海水準の（上昇 ／ 低下）によって形成される，樹枝状の入り江をもつ海岸。長期的に（隆起 ／ 沈降）を続けている地域に形成されやすい。

まとめ

・断層や褶曲の発達により，特徴的な地形が形成されることがある。たとえば，河川の屈曲は＿＿＿＿＿＿＿＿により形成される。

・氷期と間氷期がくり返された第四紀において，＿＿＿には海面が上昇し，＿＿＿には海面が低下した。

・地殻変動と海面の高さの変動により，特徴的な地形が形成されることがある。たとえば，過去の海食台がもととなった陸上の平坦面を＿＿＿＿＿＿といい，相対的海水準の＿＿＿により形成される。

Chapter2　演習問題

ここでは，海岸段丘の形成について，模式的な例を用いて確認しましょう。

問題(1)　海面の高さが一定だとみなせる時期の段丘面の形成について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

海岸付近の海面下には海食台と呼ばれる平坦面が形成されることがある。この地域が地震によって数m程度隆起すると，それまで海面下にあった平坦面が海面よりも上に位置するようになる。そして，海岸線は地震前よりも（陸側 / 海側）に移動し，その海岸付近では新たな平坦面の形成が始まる。

ここで，地震と地震の間には地震時と逆向きのゆっくりとした地殻変動が起こることが多い。たとえば，地震時に毎回1m隆起して，地震間に毎回1m沈降すると，あるときの海面下に形成されていた平坦面の標高は長期的にみて（高くなり / 一定であり / 低くなり），段丘が（形成される / 形成されない）。一方で，地震時に毎回3m隆起して，地震間に毎回1m沈降すると，あるときの海面下に形成されていた平坦面の標高は長期的にみて（高くなり / 一定であり / 低くなり），段丘が（形成される / 形成されない）。

知っておこう

海溝付近には，プレートどうしが強く固着していてひずみを蓄積し，地震によってそのひずみを急激に解放する領域があります。このような領域を**アスペリティ**といいます。地震による段丘面が形成されるのは，アスペリティの近くに位置する海岸だといえます。

なお，プレート境界がすべてアスペリティになっているわけではなく，地震を起こさずにゆっくりと滑っているためにひずみが蓄積されない領域もあることが知られています。

問題⑵ 海面の高さが周期的な変動をくり返す場合の段丘面の形成について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

岩石からなる海岸の海岸線には，侵食によって海食崖と呼ばれる切り立った崖が形成されることがある。その下端は海面付近であり，その海側には海食台が形成される。

第四紀は，氷期と間氷期が交互に訪れる時代である。過去 70 万年程度については，平均およそ（1 万年 / 10 万年）の周期で海面の高さが（100 ～ 150cm ／ 100 ～ 150m）程度変化してきたことが知られている。寒冷化によって海面が（上昇 / 低下）するとき，海岸線は（陸側 / 海側）へと移動する。また，温暖化によって海面が（上昇 ／ 低下）するとき，海岸線は（陸側 / 海側）へと移動する。

海面の高さの極大期 A と次の極大期 B で海面が同じであり，その間で地殻変動がなかったとする。このとき，2 つの極大期で海食崖の形成される高度は同じであり，段丘は形成されない。一方で，海面の高さの極大期 A と次の極大期 B で海面が同じであり，その間で 150m の隆起が起こったとする。このとき，相対的海水準は 150m だけ（上昇 ／ 低下）したことになる。すなわち，極大期 A とくらべて極大期 B には海岸線が（陸側 ／ 海側）に移動し，極大期 A に形成された海食崖の下端は，極大期 B に形成されている海食崖の下端より 150m（上側 ／ 下側）に位置する。この 2 つの崖の間が，比較的平坦な段丘面となる。

第 8 講　PART2　確認問題

次の文章を読み，下の問いに答えよ。

問１　地表にある様々な地形は，地殻変動により形成されるものがある。例えば，a 断層運動や b 褶曲の発達により山地や河川が影響を受け，特徴的な地形となることがある。

(1)　下線部ａについて，正断層や逆断層によって形成される地形として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　扇状地　　②　盆地
③　Ｖ字谷　　④　河岸段丘

(2)　下線部ｂについて，褶曲によって形成された地形として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ヒマラヤ山脈　　②　ハワイ諸島
③　ナイル川　　④　大西洋中央海嶺

問２　海面の高さである海水準は時代とともに変動している。海水準の上昇は，（　ア　）に海面が上昇した場合だけでなく，地形自体が（　イ　）した場合も考えることができる。
　海水準の変動により c 様々な地形が形成される。高知県室戸岬周辺では，海抜 200m にもおよぶ d 海岸線に平行な階段状の地形が形成されている。

(1)　空欄ア，イに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ア：氷期　　イ：隆起
②　ア：氷期　　イ：沈降
③　ア：間氷期　　イ：隆起
④　ア：間氷期　　イ：沈降

⑵　下線部ｃについて，海水準の変動によって形成される河岸段丘とリアス海岸の形成の仕方の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　河岸段丘…隆起　　リアス海岸…隆起
②　河岸段丘…隆起　　リアス海岸…沈降
③　河岸段丘…沈降　　リアス海岸…隆起
④　河岸段丘…沈降　　リアス海岸…沈降

⑶　下線部ｄについて，この地形の名称として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　海食台　　②　三角州
③　海食崖　　④　海岸段丘

PART3 地殻変動と大陸地殻の形成

目標　プレートの収束によって大陸地殻が成長する過程について説明できる。

Chapter1　地殻変動と大陸地殻の形成

地殻変動がさかんな場所は，日本列島やヒマラヤ山脈のようなプレートの収束境界にあたります。ここでは，プレートの収束と大陸地殻の形成について学びましょう。

造山運動と造山帯

・**造山運動**

プレートの収束境界では，地殻に対して水平方向の圧縮の力がはたらき，地殻の岩石や地層が大きく変形し，大規模な山脈が形成されることもある。このような作用を**造山運動**という。

・**造山帯**

造山運動の起こっている場所を**造山帯**という。

現在造山運動が起こっているプレートの収束境界は大陸の縁にあたるが，収束が進んで大陸どうしが衝突すると，それまでの収束境界は衝突でできた大陸全体から見ると大陸の（内部 / 縁）にあたるようになり，新しい収束境界が大陸の（内部 / 縁）に形成される。このようにして残された過去の造山帯の痕跡として，（アルプス山脈 / ウラル山脈）が挙げられる。

なお，過去の造山帯は侵食されてなだらかになる傾向にある。現在の大陸地域の中央部には，顕生代に造山運動をほとんど経験していない平らな地域が広がっており，これを**安定地塊**という。特に，先カンブリア時代の岩石が露出して盾を伏せたようななだらかな地形になっている地域を**盾状地**という。

大陸地殻の成長

・**弧－海溝系**

島弧や陸弧と海溝が対となっているプレートの沈み込み境界を**弧－海溝系**〔島弧の場合，島弧－海溝系〕という。

・**弧－海溝系の火成活動と大陸地殻の成長**

上部マントルの（かんらん岩 / 玄武岩）

↓〔部分溶融〕

（かんらん岩質 / 玄武岩質）マグマ

↓〔地殻の下部でゆっくりと冷える〕

（花こう岩 / 斑れい岩）の下部地殻の形成

↓〔再び部分溶融し，結晶分化作用を受ける〕

（花こう岩 / 斑れい岩）の上部地殻の形成

→プレートの沈み込み境界は，地下の火成活動により大陸地殻が大きく成長する唯一の場所になっている。

まとめ

・プレートの収束境界において地殻が大きく変形される作用を＿＿＿＿＿＿といい，この作用の起こっている場所を＿＿＿＿＿＿という。

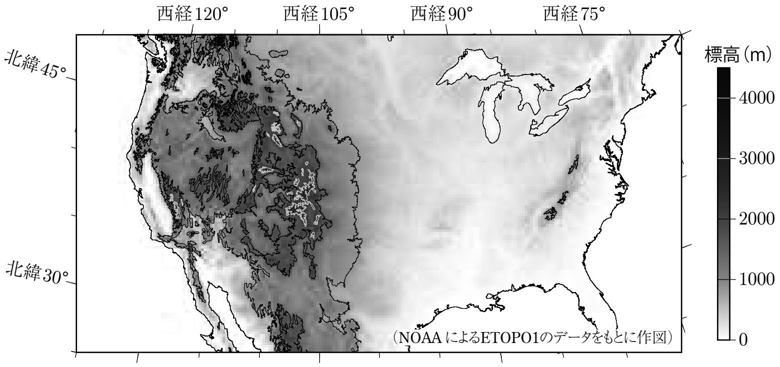
・現在の大陸に広がる平らな地域を＿＿＿＿＿＿といい，特に先カンブリア時代の岩石が露出した地域を＿＿＿＿＿という。

・プレートの収束境界では，＿＿＿＿岩が部分溶融して生じた＿＿＿＿岩質マグマにより，＿＿＿＿＿岩の下部地殻が形成される。この地殻が部分溶融して＿＿＿＿＿＿＿＿を受けることにより，＿＿＿＿岩の上部地殻が形成される。

Chapter2　演習問題

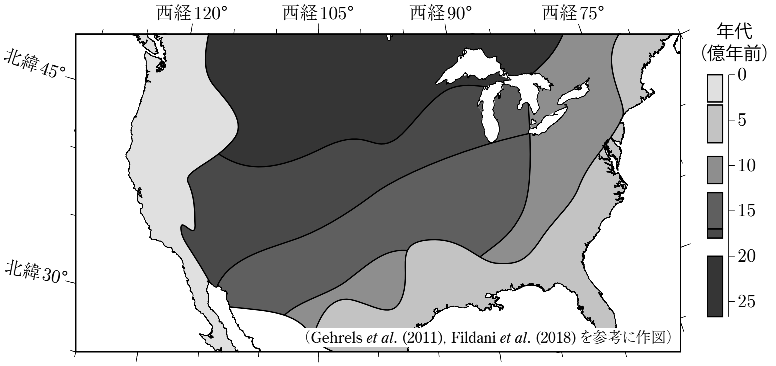
ここでは，北米大陸を例として，造山帯の位置の変化について理解を深めましょう。

問題(1)　次の図は，北米大陸の標高の分布を示しています。この図について述べた下の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。



北米大陸の中央部は広大な平野となっており，標高1000m を超えるような山地となっているのは西部と東部に限られる。特に，標高が 4000m を超える領域の広がる険しい山脈となっているのは(西部 / 東部)である。これは，東西２つの地域では造山運動を経験した時期が異なっており，西部の方が東部よりも（古い / 新しい）造山帯であることに対応している。

問題⑵ 次の図は，北米大陸の基盤を構成する岩石の年代を大まかに示したものです。この図について述べた下の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。



図に示されている北米大陸の大部分には，（冥王代 / 太古代 / 原生代 / 顕生代）に形成された岩石が分布している。さらに細かく見ると，西部に分布する南北にのびた領域を除き，大まかに言えば北西から南東に向かって年代が（新しく / 古く）なっている。つまり，北米大陸の位置を固定して考えたとき，大陸の成長にともなってプレートの沈み込み境界は（北西から南東 / 南東から北西）へと移動してきたと考えられる。

第8講　PART3　確認問題

次の文章を読み，下の問いに答えよ。

問1　プレートが収束する境界において，大陸どうしが衝突すると幅 100 km 以上，延長 1000 km を超える a 細長い帯状の複雑な地質構造の地帯が形成される。これを（　ア　）といい，（　ア　）を生み出すプレート境界の作用を（　イ　）という。

長期間安定な大陸地殻を（　ウ　）といい，その中でも特に古く，特徴的な地形になっている地域を（　エ　）という。

(1)　空欄ア，イに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ア：造山帯　　イ：変成作用
②　ア：造山帯　　イ：造山運動
③　ア：変成帯　　イ：造山運動
④　ア：変成帯　　イ：変成作用

(2)　空欄ウ，エに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ウ：安定地塊　　エ：盾状地
②　ウ：安定地塊　　エ：超大陸
③　ウ：盾状地　　エ：超大陸
④　ウ：盾状地　　エ：安定地塊

(3)　下線部 a について，この地帯について述べた文として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　古いものほど大陸の内部にある。
②　古いものほど険しい形になっている。
③　新生代に形成されたものはない。
④　ほとんどは北アメリカ大陸に集中している。

問２　大陸地殻はプレートが（　オ　）境界で成長する。ここでは水の供給を受け，上部マントルをつくっている（　カ　）の融点が下がり，部分溶融して（　キ　）質マグマができる。この（　キ　）質マグマは上昇して地殻の下部となる。この地殻がさらに部分溶融し，結晶分化作用を受けて流紋岩質マグマができる。この流紋岩質マグマが冷却・固化することにより上部地殻を形成する（　ク　）ができる。

⑴　空欄オに入る語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　沈み込む　　②　衝突する
③　拡大する　　④　すれ違う

⑵　空欄カ～クに入る岩石名の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　カ：花こう岩　キ：安山岩　ク：かんらん岩
②　カ：花こう岩　キ：玄武岩　ク：かんらん岩
③　カ：かんらん岩　キ：玄武岩　ク：花こう岩
④　カ：かんらん岩　キ：安山岩　ク：花こう岩

PART4 付加体の形成と構造侵食

目標 付加体と構造侵食について，大陸地殻の進化と関連付けて説明できる。

Chapter1　付加体の形成と構造侵食

プレートの沈み込み境界では，地殻に水平方向の圧縮の力がはたらいています。ここでは，沈み込みにともなって海溝で起こることについて確認していきましょう。

付加体

・海洋プレート層序

海のプレートの上部には，形成から沈み込みまでの間に

海嶺………玄武岩

遠洋域……（放散虫 / 有孔虫）の殻を主とするケイ質堆積物

海溝付近…陸源砕屑物

が順に重なっていく。これらの重なりを**海洋プレート層序**という。

・付加体

海のプレート上の岩石や地層が海溝で陸側に押し付けられ，陸のプレートの底に付け加えられることがある。このようにしてできた地質体を**付加体**という。

構造侵食と大陸地殻の進化

・**構造侵食**

沈み込む海のプレートが，陸のプレートの先端にあった付加体を底面から削り取り，マントルへと運び去ることがある。これを**構造侵食**という。

・**大陸地殻の進化**

大陸地殻は，弧－海溝系の地下の火成活動によって成長する。ここで形成された深成岩や，火山弧の火成活動で生じた火山岩は，やがて（続成作用 ／ 風化作用）によって砕屑物となり，付加体を構成して大陸地殻を海のプレート側へと広げる。これにより，海溝は海側へと移動する。

この過程で，大陸地殻の一部は構造侵食により失われる。そのため，日本列島のような大陸の縁に残されている花こう岩や付加体は，古い時代のものより新しいものの方が多い。

まとめ

・海のプレート上の岩石や地層が陸側に押し付けられ，陸のプレートの底に付け加えられてできた地質体を＿＿＿＿＿という。

・この地質体の形成により，大陸地殻は海側に広がる。

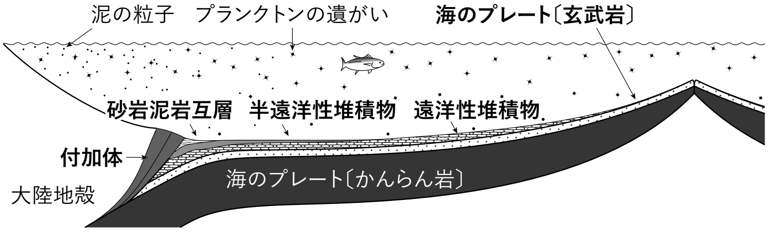
・沈み込む海のプレートが付加体を底面から削り取り，マントルへと運び去ることを＿＿＿＿＿＿という。

・この過程により，大陸地殻の先端はマントルへと運び去られて失われる。

Chapter2　演習問題

ここでは，付加体の形成過程と内部構造について，模式的な例を用いて確認しましょう。

問題⑴　次の図は，海洋プレートが海嶺で形成されてから海溝で沈み込むまでのようすを表す模式図です。この図について述べた下の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。



知っておこう

実際の付加体の形成時には，海洋プレート層序をすべてはぎ取ってしまうというわけではありません。左の図は，海洋プレートの上にどのようなものが堆積し，失われていくのかを極端に示した模式図です。

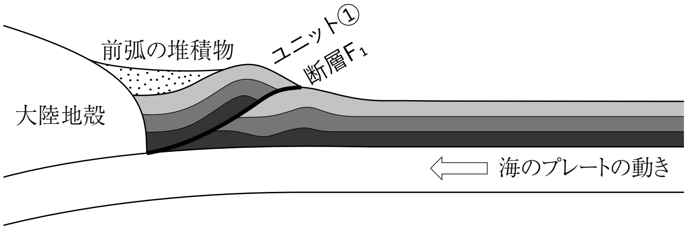
海嶺で形成される海洋プレートの最上部は，マグマが海水によって急冷されてできた玄武岩からなる。陸地から離れた地域には砕屑物があまり供給されないため，玄武岩の上面にはプランクトンの遺がいを中心とした遠洋性堆積物が積み重なっていく。遠洋性堆積物は（$CaCO_3$ / SiO_2）を主成分とする殻をもつ（放散虫 / 有孔虫）の遺がいが中心となっており，この堆積物が固結すると（チャート / 石灰岩）になる。

プレートが陸地に近づくと，陸からの泥が堆積物に含まれるようになる。この堆積物を半遠洋性堆積物という。海溝付近では泥の量が増え，さらに乱泥流による（クロスラミナ / タービダイト）が堆積し，砂岩泥岩互層が形成される。

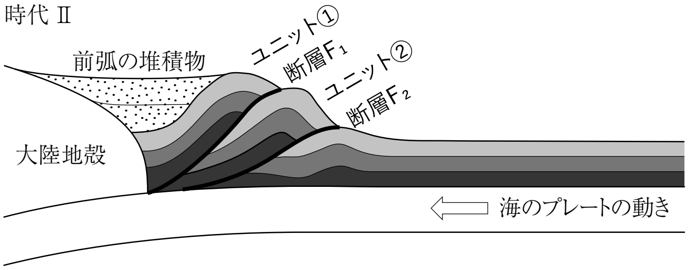
このようにして，海洋プレートの上面には海嶺から海溝までのさまざまな場所の堆積物が順に堆積していく。これらの重なりを海洋プレート層序という。

問題(2)　次の図は，付加体の形成過程を模式的に表したものです。この図について述べた下の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

時代Ⅰ



時代Ⅱ



時代Ⅰには,（正断層 / 逆断層）F_1 を境にして海洋プレート上の堆積物〔ユニット①〕が大陸側にはぎ取られている。

時代Ⅰから時代Ⅱまでにプレートの沈み込みが進み，時代Ⅱには（正断層 / 逆断層）F_2 を境にして海洋プレート上の堆積物〔ユニット②〕が大陸側にはぎ取られている。

このくり返しにより新しい付加体が作られていくので，新しい時代に形成された付加体のユニットほど（陸側 / 海側）に位置しているといえる。

知っておこう

左の図の「前弧の堆積物」は，陸地と付加体との間に形成されたお盆のような領域〔これを前弧海盆といいます〕に堆積した陸源砕屑物です。**問題**(1)の砂岩泥岩互層とは異なることに注意しましょう。

第 8 講　PART4　確認問題

次の文章を読み，下の問いに答えよ。

問 1　プレートの沈み込み境界である海溝の陸側には（　ア　）とよばれる地質体が存在する。この地質体は a 海のプレートの表面に形成された岩石や，堆積した地層（海洋プレート層序）が，b 海溝ではがされ，陸のプレートの先端に取り込まれたものである。

(1)　空欄アに入る語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　広域変成帯　　②　沈み込み帯

③　海溝　　④　付加体

(2)　下線部 a について，海洋プレート層序の構造として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。ただし，左が下位のものとする。

①　玄武岩　→　陸源性砕屑岩　→　ケイ質堆積岩

②　玄武岩　→　ケイ質堆積岩　→　陸源性砕屑岩

③　陸源性砕屑岩　→　玄武岩　→　ケイ質堆積岩

④　陸源性砕屑岩　→　ケイ質堆積岩　→　玄武岩

(3)　下線部 b について，この際，断層が形成され，そこから地質体がはがされるときに形成される断層の種類として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　正断層　　②　逆断層

③　横ずれ断層　　④　トランスフォーム断層

問２　大陸地殻は，プレートの沈み込み帯の火成活動により成長する。海のプレートが沈み込む際に，c付加体が付加されたり，逆にd付加体を底面から削り取る作用がはたらいたりして大陸地殻は変化する。このようにして，大陸地殻は長い時間をかけて進化している。

(1)　下線部ｃについて，付加体が付加されることによって起こる現象として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　海溝の深さが浅くなる
②　海溝の深さが深くなる
③　海溝の位置が海側へ移動する
④　海溝の位置が陸側へ移動する

(2)　下線部ｄについて，このような作用の名称として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　構造侵食　　②　変成作用
③　物理的風化　　④　化学的風化

PART5 変成作用と変成岩

目標 2種類の広域変成作用と，それにより形成される代表的な変成岩について説明できる。

Chapter1　変成作用と変成岩

地学基礎では，一度形成された岩石が，高温や高圧によって元とは異なる岩石に変化することがあるということを学んでいます。この変成作用について，少し詳しく見ていきましょう。

変成作用と変成岩 地学基礎

・**変成作用**

形成された環境と異なる温度・圧力の環境に岩石がおかれると，中に含まれていた鉱物が固体の状態のままで元とは異なる結晶構造に変化することがある。このような作用を**変成作用**という。

・**変成岩**

変成作用を受けてできた岩石を**変成岩**という。変成岩のもととなった岩石を原岩という。

広域変成作用

・**広域変成作用とは** 地学基礎

島弧－海溝系では，プレートの沈み込みや火成活動などの影響により，同じ深さでも周囲とは温度が異なる。そのため，海溝に沿った幅数十 km，長さ数百 km 以上にわたる帯状の地域で変成作用が起こり，これを**広域変成作用**という。

・**広域変成岩と広域変成帯**

広域変成作用でできた変成岩を**広域変成岩**，広域変成岩が分布する帯状の場所を**広域変成帯**という。

・**低温高圧型と高温低圧型の変成作用**

海溝付近…海のプレートは低温のまま沈み込む。そのため，海のプレートの上面は同じ深さの周囲とくらべて低温であり，そこでは低温高圧型の変成作用が起こる。

火山弧……高温のマグマが地殻内部に上昇してきている。そのため，火山弧の地下は同じ深さの周囲とくらべて高温であり，そこでは高温低圧型の変成作用が起こる。

・**低温高圧型と高温低圧型の代表的な変成岩**

低温高圧型……比較的細粒の鉱物が一方向に並び，平行な面で板状に割れやすい性質をもつ（片麻岩 / 片岩）

高温低圧型……比較的大きく成長した有色鉱物と無色鉱物が交互の縞状に並ぶ（片麻岩 / 片岩）

接触変成作用 地学基礎

・**接触変成作用とは**

地表付近に高温のマグマが貫入すると，周囲の岩石が強く熱せられる。このとき，入り込んだマグマに接する厚さ数 m ～数 km の範囲で変成作用が起こり，これを**接触変成作用**という。

・**代表的な接触変成岩**

砕屑岩を原岩とするもの……（ホルンフェルス / チャート）

石灰岩を原岩とするもの……結晶質石灰岩〔大理石〕

まとめ

・沈み込み帯では，海溝に沿って広域変成帯が形成される。

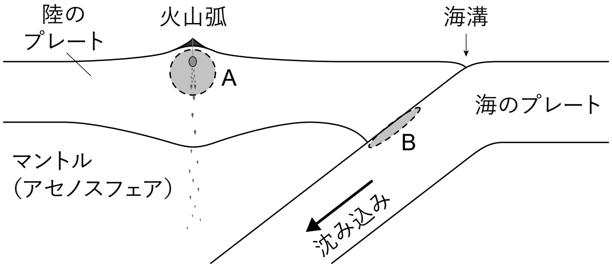
・海溝付近の地下では＿＿＿＿＿＿型の変成作用，火山弧の地下では＿＿＿＿＿＿型の変成作用が起こる。

・片麻岩は＿＿＿＿＿＿型，片岩は＿＿＿＿＿＿型の広域変成岩である。

Chapter2　演習問題

　ここでは，広域変成作用について，模式図を用いて確認しましょう。

問題(1)　次の図は，日本列島のようなプレートの沈み込む境界を模式的に表したものです。この図について述べた下の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

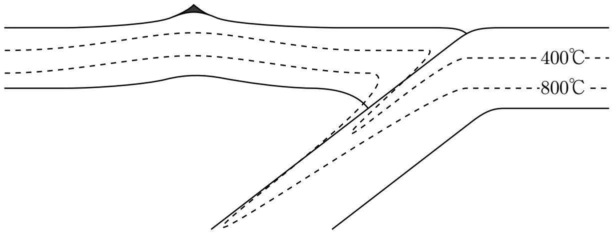


　図の A の部分は，地殻の温度が周囲と比べて（高い / 低い）領域である。この領域では，（片麻岩 / 片岩）が形成されやすい。

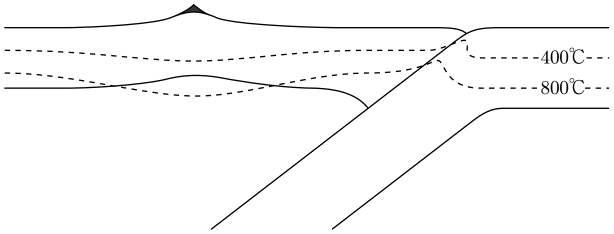
　一方，冷たい海のプレートが深くまで沈み込んでいくため，図の B の部分は周囲と比べて温度が（高い / 低い）領域となっている。この領域では，（片麻岩 / 片岩）が形成されやすい。

問題⑵　問題⑴の図の領域について等温線を描いたものとして適当なものは，次の X，Y のうちどちらでしょうか。判断の理由とともに答えましょう。

X



Y



第８講　PART5　確認問題

次の文章を読み，下の問いに答えよ。

問１　火成岩や堆積岩が温度や圧力の影響を受けて，鉱物が再結晶し，別の岩石になることがある。このような作用を変成作用といい，変成作用によりできた岩石を変成岩という。

島弧―海溝系におけるプレートの沈み込みや火成活動の影響により起こる変成作用を，（　ア　）変成作用といい，a低温高圧型と高温低圧型に分けられる。また，高温のマグマが貫入し，周囲の岩石が強く熱せられることにより起こる変成作用を，b（　イ　）変成作用という。

(1)　空欄ア，イに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ア：広域　　　イ：高温
②　ア：広域　　　イ：接触
③　ア：高圧　　　イ：高温
④　ア：高圧　　　イ：接触

(2)　下線部ａについて，低温高圧型の変成作用が起こる場所と代表的な変成岩の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　場所…火山弧　　変成岩…片麻岩
②　場所…火山弧　　変成岩…片岩
③　場所…海溝付近　　変成岩…片麻岩
④　場所…海溝付近　　変成岩…片岩

⑶　下線部ａについて，高温低圧型の変成作用が起こる場所と代表的な変成岩の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　場所…火山弧　　変成岩…片麻岩
②　場所…火山弧　　変成岩…片岩
③　場所…海溝付近　変成岩…片麻岩
④　場所…海溝付近　変成岩…片岩

⑷　砕屑岩が下線部ｂの変成作用を受けてできる変成岩として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　片麻岩　　②　片岩
③　ホルンフェルス　　④　大理石

PART6 変成条件の推定

目標　代表的な鉱物の多形と，そこから推定される変成条件について説明できる。

Chapter1　変成条件の推定

変成岩には，さまざまな温度・圧力条件で形成されたものがあることを学びました。それらの条件は，どのようにして推定されるのでしょうか。

多形と相図

・多形

鉱物は，原子やイオンが規則正しく配列している固体である。

同じ化学成分の固体でも，温度・圧力条件によって粒子の安定な配列のしかた〔結晶構造〕が異なっている。そのため，同じ化学成分でも結晶構造の異なる鉱物が存在する。それらの鉱物の関係を**多形**という。

・相図

温度・圧力条件によって，ある物質の安定に存在できる気体，液体，固体といった状態，あるいは多形は異なっている。この状態と多形を総称したものを相といい，温度・圧力条件と安定な相との関係を示した図を相図という。

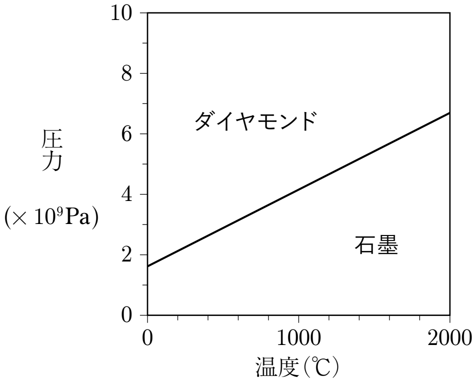
知っておこう

大学で鉱物学や岩石学を学ぶときは，横軸に固溶体の成分，縦軸に温度をとった相図も重要になります。

高校地学では，温度と圧力を軸とした相図を正しく読み取ることができれば十分です。

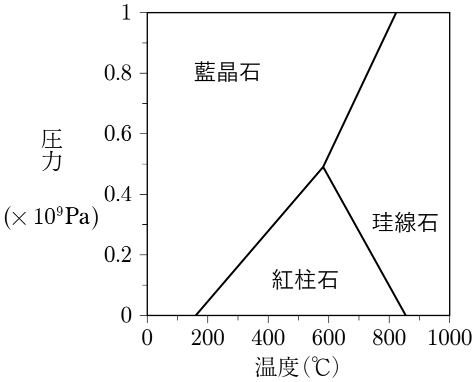
変成鉱物と変成条件

・C の相図



→ダイヤモンドは，石墨とくらべて（低温高圧 / 高温低圧）の条件下で安定な鉱物。

・Al_2SiO_5 の相図



→藍晶(らんしょう)石だけを含む変成岩は，紅柱石だけを含む変成岩とくらべて（低温高圧 / 高温低圧）の条件で形成されたと推定できる。

> **知っておこう**
> 相図が示すのはあくまで「安定な」相です。相の間の変化〔相転移〕にはエネルギーが必要であり，条件を変えたからといって必ず一瞬で相転移が起こるというわけではありません。輝くダイヤモンドが気付いたら真っ黒な石墨になっていた……などということがないのはそのためです。

まとめ

・同じ化学成分でも結晶構造の異なる鉱物が存在する。そのような鉱物どうしの関係を＿＿＿＿＿という。

・化学組成 C の鉱物としては，低温高圧で安定なダイヤモンドと，高温低圧で安定な＿＿＿＿＿がある。

・化学組成 Al_2SiO_5 の鉱物には紅柱石，藍晶石，＿＿＿＿＿がある。これらのうち最も低温高圧で安定なものは＿＿＿＿＿である。

Chapter2　演習問題

ここでは，Al_2SiO_5 の相図を用いて，相図についての理解を深めましょう。

問題(1)　地下の圧力について述べた次の文章中の空欄［　**ア**　］～［　**エ**　］に入る式を答えましょう。

地下の深さ z における圧力は，単位面積にはたらく地表から深さ z までの岩石柱の重さ，すなわち岩石柱にはたらく重力である。底面積 S，高さ z の岩石柱の体積は［　**ア**　］であり，この岩石柱の平均密度を ρ とすると，その質量は［　**イ**　］である。よって，重力加速度を g とすると，地表から深さ z までのこの岩石柱にはたらく重力は，［　**ウ**　］と表せる。したがって，深さ z における圧力を P とすると，

$P=$［　**エ**　］　……①

である。

問題(2)　地下の圧力について述べた次の文章中の空欄［　**オ**　］・［　**カ**　］に入る数値を上から1桁の概数で答えましょう。ただし，$1\text{GPa}=1\times10^9\ \text{Pa}$ であり，$1\text{Pa}=1\text{N/m}^2$，$1\text{N}=1\text{kg}\cdot\text{m/s}^2$ です。

地殻の岩石の平均密度を 3g/cm^3 とする。この密度の単位を変換すると，［　**オ**　］kg/m^3 と表せる。さらに重力加速度を 10m/s^2 とすると，**問題(1)**の①式を用いて，圧力が 0.6GPa となる深さは［　**カ**　］km であることがわかる。

ここがPOINT

Pa や N の単位は複雑に見えますが，長さの単位を m，質量の単位を kg，時間の単位を s で表したとき，

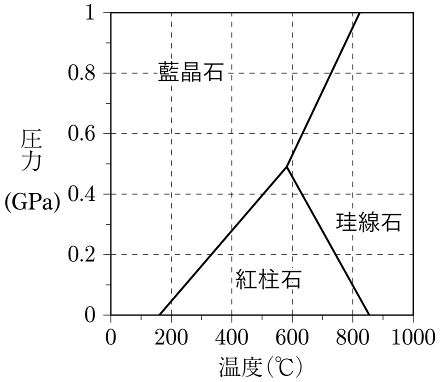
（圧力）＝（力）/（面積）

（力）＝（質量）×（加速度）

であることを用いると，特別な係数を掛ける必要がないようにできています。

言い換えると，数値計算のときには単位をこれらのものに揃えておくとよい，ということですね。

問題(3) 次の図は，Al_2SiO_5 の相図です。この図について述べた下の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。ただし，地表の温度は 0℃とします。



火山弧では，高温のマグマが地殻内部に上昇してきている。そのため，火山弧では平均的な地下増温率が（大きい / 小さい)。それに対して，海溝付近では低温のプレートが沈み込んでいる。そのため，海溝付近では平均的な地下増温率が（大きい / 小さい)。

ここで，地下増温率が 20K/km の地域 **A** と 50K/km の地域 **B** について考えよう。地域 **A** で圧力が 0.6GPa になる深さでは温度が約（40 / 100 / 400 / 1000）℃であり，この条件では（藍晶石 / 珪線石）が安定に存在する。それに対して，地域 **B** で圧力が 0.6GPa になる深さでは温度が約（40 / 100 / 400 / 1000）℃であり，この条件では（藍晶石 / 珪線石）が安定に存在する。

地下増温率の特徴をもとにすると地域 **A** は（火山弧 / 海溝付近)，地域 **B** は（火山弧 / 海溝付近）に対応するといえる。また，このことから，藍晶石は（低温高圧型 / 高温低圧型）の変成岩である（片麻岩 / 片岩）に含まれやすく，珪線石は（低温高圧型 / 高温低圧型）の変成岩である（片麻岩 / 片岩）に含まれやすいと考えられる。

第8講　PART6　確認問題

次の文章を読み，下の問いに答えよ。

問１　鉱物を構成する原子やイオンは，鉱物が形成されるときの温度・圧力条件によってその配列のしかた（結晶構造）が異なる。結晶構造が異なると同じ化学組成であっても物理的な性質が異なり，このような鉱物どうしの関係を（　ア　）という。

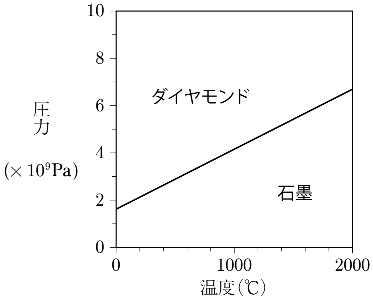
⑴　空欄アに入る語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

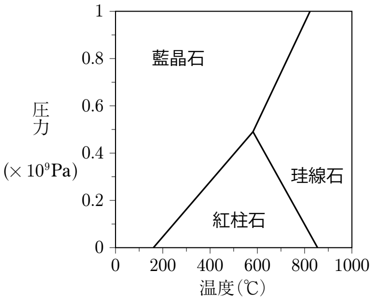
①　自形　　②　他形
③　片理　　④　多形

⑵　ダイヤモンドと互いに空欄アの関係になっている鉱物として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　石英　　②　石墨
③　紅柱石　　④　藍晶石

問２　下図は鉱物がどのような温度・圧力条件の下で形成されるのかを示したもので相図という。変成岩中にどんな鉱物が存在するのかを調べ，その鉱物に関する相図を読み取ることにより，変成岩が形成されたときの温度や圧力を推定することができる。





(1) 600℃，0.2×10^9 Pa という条件下で形成された鉱物が，温度・圧力の変化により，珪線石に変わったとする。このときの温度・圧力の変化として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① 温度・圧力ともに上昇した。

② 温度・圧力ともに低下した。

③ 圧力は変化せず，温度が低下した。

④ 圧力が低下し，温度は変化しなかった。

(2) 紅柱石，珪線石，藍晶石のうち，ダイヤモンドが形成される温度・圧力条件下で，形成されるものとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① 紅柱石　　② 珪線石

③ 藍晶石　　④ 紅柱石，珪線石，藍晶石

第 9 講　地表の変化

PART1 風化作用

目標　物理的風化と化学的風化について，例を挙げて説明できる。

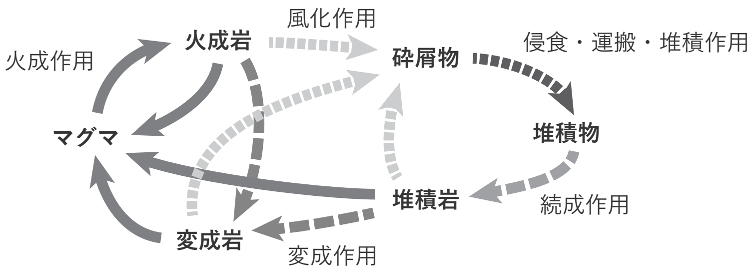
Chapter1　風化作用

地表に露出した岩石は，さまざまな作用を受けて堆積岩へと変化していきます。ここでは，風化作用について学びましょう。

岩石サイクル

・岩石サイクルとは

地表に露出した岩石は，水のはたらきなどによって形を変える。そして，やがて地球内部の圧力や熱のはたらきによって形を変え，一部はマグマとなって火成岩として再び地表に露出する。このような岩石の循環のことを**岩石サイクル**と呼ぶ。



風化作用

・風化作用とは

地表の岩石をその場〔常温・常圧の条件〕で変化させる作用を**風化作用**という。風化作用には，さまざまな形で水が関わっていることが多い。

・物理的風化

長い時間のうちに岩石を物理的に破砕する作用を**物理的風化**という。1 日や 1 年の中での温度差が大きい地域で起こりやすい。

熱風化……鉱物によって熱膨張率が異なり，岩石が膨張・収縮をくり返すことで割れ目を生じる。

凍結風化…岩石の割れ目に入った水が凍結・膨張することで割れ目を広げる。

塩類風化…岩石の割れ目に入った水に溶けていた成分〔塩類〕が結晶となることで割れ目を広げる。

・**化学的風化**

岩石の成分が水中に溶け出したり，鉱物が他の鉱物に変化したりする作用を**化学的風化**という。温暖で降水量の多い地域で起こりやすい。

石灰岩の化学的風化……炭酸カルシウム〔$CaCO_3$〕が溶解し，（ボーキサイト鉱床 / カルスト地形）をつくる。

花こう岩の化学的風化…カリ長石〔$KAlSi_3O_8$〕などの造岩鉱物が粘土鉱物に変化する。

風化残留鉱床の形成……高温多雨の熱帯地域では粘土鉱物の SiO_2 成分が水中に溶け出し，アルミニウムの成分が残って（ボーキサイト鉱床 / カルスト地形）が形成される。

知っておこう

雨水には大気中の二酸化炭素が溶け込んでいるため，人間活動の影響がなくても pH=5.67 程度の酸性となっています。また，地中では微生物や植物の呼吸の影響で二酸化炭素濃度が大気中よりも高いことに加えて，植物の根から放出される酸の影響もあり，地下水の pH はさらに小さい〔酸性度が高い〕ことが多くなっています。化学的風化の化学反応には，多くの場合このような酸性の雨水や地下水が関わっています。

まとめ

・地表の岩石をその場〔常温・常圧の条件〕で変化させる作用を風化作用という。
・岩石が膨張・収縮をくり返すことや，岩石の割れ目に入った水に溶けていた塩類が結晶となることによる風化作用を総称して＿＿＿＿＿＿＿という。
・石灰岩の炭酸カルシウムが水中に溶解して＿＿＿＿＿地形が作られたり，粘土鉱物をもとにしてアルミニウムの鉱床である＿＿＿＿＿＿＿鉱床が作られたりする作用を総称して＿＿＿＿＿＿＿という。

Chapter2　演習問題

ここでは，風化作用について確認しましょう。

問題⑴　花こう岩の風化について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

花こう岩は（斑状組織 / 等粒状組織）をもつ深成岩であり，地下深くにおいて形成された岩石である。このような岩石が地表付近にもたらされると,形成時よりも圧力の（高い / 低い）環境に置かれることになる。このように圧力が低下することは，岩石中に微細な割れ目が形成されやすくなる原因の 1 つである。

また，花こう岩は，無色鉱物の斜長石，カリ長石，石英，有色鉱物の角閃石,（かんらん石 / 黒雲母）といったさまざまな鉱物を含む。これらの鉱物は熱膨張率が異なっており，石英は長石とくらべて膨張率が数倍大きい。そのため，温度変化により花こう岩が膨張と収縮をくり返すと，粒子どうしの間にすき間が形成されて，岩石中の微細な割れ目となる。

さらに，花こう岩の岩石中に割れ目が形成されると，そこには水がしみ込みやすくなる。寒冷な環境でしみ込んだ水が氷になると体積が（増加 / 減少）し，割れ目を押し広げる。これは，物理的風化の 1 つである。また，割れ目が形成されることで岩石と水の接触する面積が（増加 / 減少）するため，岩石中の鉱物が化学的風化によって粘土鉱物に変化しやすくなる。

このようにして，花こう岩はさまざまな風化作用を受けて変化していく。花こう岩の風化の結果として形成される砂を真砂（まさ）といい，花こう岩の広く分布する西日本に多く見られる。

問題⑵　植物と風化作用について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

植物の関わる風化作用は，生物的風化と呼ばれることがある。

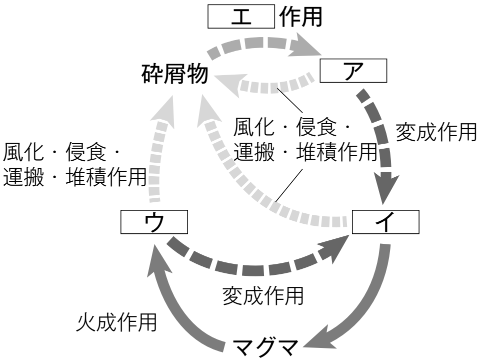
たとえば，植物の根は岩石中の割れ目に入り込み，成長することで割れ目を押し広げる。これは，（物理的風化 / 化学的風化）の 1 つと考えることができる。

また，植物の根は酸性の有機物を放出する。この酸性の有機物によって岩石や土壌中から水に溶けにくい成分を溶け出させて，植物は栄養源となる元素を獲得する。これは，（物理的風化 / 化学的風化）の 1 つと考えることができる。

これらのように，生物的風化は物理的風化や化学的風化に分類することもできるさまざまな作用を合わせたものだといえる。

第９講　PART1　確認問題

問１　次の図は岩石サイクルを模式的に表したものである。下の問いに答えよ。



(1)　図中のア～ウに入る岩石の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ア：堆積岩　　イ：変成岩　　ウ：火成岩
②　ア：堆積岩　　イ：火成岩　　ウ：変成岩
③　ア：変成岩　　イ：堆積岩　　ウ：火成岩
④　ア：変成岩　　イ：火成岩　　ウ：堆積岩

(2)　図中のエに入る作用として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　同化　　　　②　結晶分化
③　続成　　　　④　相互

問２　次の文章を読み，下の問いに答えよ。

地表に露出した岩石が，砕かれたり，溶かされたりする現象を風化作用という。長い時間のうちに岩石を物理的に破砕するような風化作用を（　オ　）風化という。また，雨水や地下水によって，岩石中の鉱物が溶解したり，別の鉱物に変化したりする風化作用を（　カ　）風化という。カルスト地形は（　キ　）の（　カ　）風化によって形成される。

(1)　空欄オ～キに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　オ：化学的　　カ：物理的　　キ：花こう岩
②　オ：化学的　　カ：物理的　　キ：石灰岩
③　オ：物理的　　カ：化学的　　キ：花こう岩
④　オ：物理的　　カ：化学的　　キ：石灰岩

(2)　（　オ　）風化と（　カ　）風化はそれぞれどのような気候のところで起こりやすいか。最も適当な組合せを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　オ：砂漠気候　　カ：寒冷で乾燥した気候
②　オ：砂漠気候　　カ：温暖で湿潤な気候
③　オ：熱帯気候　　カ：寒冷で湿潤な気候
④　オ：熱帯気候　　カ：温暖で乾燥した気候

(3)　（　オ　）風化の例として**誤っているもの**を，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　塩類風化　　　　　②　凍結風化
③　熱風化　　　　　　④　風化残留鉱床の形成

PART2 さまざまな地形と堆積物

目標 流水以外によって形成される地形について，例を挙げて説明できる。

Chapter1 風や氷河による地形や堆積物

地学基礎では，流れる水によって形成される地形や堆積物について学びました。ここでは，それ以外の地形と堆積物について見ていきましょう。

風による地形と堆積物

・**風による作用の特徴**

侵食や運搬の力は水よりも弱いが，（乾燥した / 湿潤な）環境では主要な役割を果たす。

・**風による地形**

砂丘……乾燥地域の扇状地や砂浜の砕屑物が風によって運ばれ，再び堆積して形成される。何度も侵食･運搬･堆積をくり返すことで，砕屑物の粒径は揃い，形は円みを帯びている。

砂漠……（亜熱帯高圧帯 / 熱帯収束帯）のように降水量とくらべて蒸発量の多い場所で，植生が全くないか非常に少ない地域が広がったもの。地表は砂とは限らず，礫や岩石に覆われていることもある。

・**風による堆積物**

風成塵…黄砂など，風によって運ばれた細粒の砕屑物。その他の堆積物が多いところでは目立たないが，半遠洋域など堆積速度の小さい場所では主要な堆積物となることもある。

火山灰…粒径が 2mm に満たない細粒の火山砕屑物。大規模な噴火では日本列島の広い範囲に同時に堆積することもある。

氷河による地形と堆積物

・**氷河とは**

万年雪……積雪が夏を越して次の冬まで残ったもの。

氷河………万年雪が自らの重みで氷となり，流動しているもの。

・**氷河の分類**

山岳氷河…山岳地域を流れる氷河。谷氷河ともいう。

氷床………大陸地域に発達する大規模な氷河。大陸氷河ともいう。

・**氷河による作用の特徴**

侵食や運搬の力は水よりも強く，寒冷な環境では主要な役割を果たすことがある。

・**氷河による地形**

カール……山の斜面をスプーンで削ったような侵食地形。

U 字谷……V 字谷を氷河が侵食して形成された U 字状の断面をもつ地形。

モレーン…氷河の端に堆積した礫によって形成された地形の高まり。砕屑物の粒径は不揃いで，形は角ばっている。

まとめ

・風による地形としては，砂丘や砂漠などがある。

・氷河による地形としては，山の斜面をスプーンで削ったような地形である＿＿＿＿や，U 字谷，モレーンなどがある。

・砂丘の砂とモレーンの礫をくらべると，粒径がよく揃っているのは＿＿＿＿＿＿＿＿であり，粒子が角ばっているのは＿＿＿＿＿＿＿＿である。

Chapter2　演習問題

ここでは，風や氷河による地形について確認しましょう。

問題(1)　鳥取砂丘について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

中国山地には，広い範囲で花こう岩が露出している。花こう岩が風化されると，（かんらん石 / 石英）や斜長石を多く含む砕屑物が生じる。この砕屑物が川によって日本海へと運ばれ，冬の強い（北西 / 南東）の季節風にともなう波によって海岸へと打ち上げられる。海岸へと打ち上げられて乾燥した砂は風によって内陸側へと運ばれるが，地形の高まりによって風速が小さくなると再び堆積し，砂丘を形成する。鳥取砂丘は，このようにして形成されたと考えられている。

砂丘の砂は，風による侵食・運搬・堆積作用をくり返し受けている。そのため, 粒子が（円みを帯びている / 角ばっている）のが特徴的である。

また，砂丘は風の流れによって形成されるため，流水によって形成される堆積物と似た特徴的な構造, すなわち（斜交層理 / 級化層理）を示すことがある。

問題⑵　日本列島の氷河地形について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

第四紀の（氷期 ／ 間氷期）にあたる現在の日本列島には，飛騨山脈にあるいくつかのものを除いて氷河が存在しない。しかし，過去の氷河の痕跡は複数の場所に残されている。

過去の氷河の痕跡の１つは，山の斜面をスプーンで削ったような地形の（モレーン ／ カール）である。これはおもに氷河による（侵食作用 / 堆積作用）によって形成される。

過去の氷河の痕跡を示すもう１つの例として，氷河によって運搬され，堆積した砕屑物による地形の高まりが挙げられる。これは（モレーン ／ カール）と呼ばれている。

これらの地形は，中部地方の飛騨山脈，木曽山脈，赤石山脈のほか，北海道の日高山脈にみられる。このことが，過去の日本列島に現在より多くの氷河が存在していた証拠となっている。

第9講　PART2　確認問題

問1　次の文章を読み，下の問いに答えよ。

風による侵食や運搬の力は流水による力より（　ア　）。風によって形成される地形には，砂丘や砂漠がある。砂丘は，（　イ　）地域の扇状地や砂浜の a砕屑物が風によって運ばれ，再び堆積して形成される。

(1)　空欄ア，イに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ア：強い　　イ：乾燥
②　ア：強い　　イ：寒冷
③　ア：弱い　　イ：乾燥
④　ア：弱い　　イ：寒冷

(2)　下線部 a について，砂丘を形成している砕屑物についての説明として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　粒径は揃っており，形は角ばっている。
②　粒径は揃っており，形は丸みを帯びている。
③　粒径は揃っておらず，形は角ばっている。
④　粒径は揃っておらず，形は丸みを帯びている。

問2　次の文章を読み，下の問いに答えよ。

夏でも低温な地域では，積雪が夏に融けることなく，次の冬まで残ることがある。このような積雪を（　ウ　）という。（　ウ　）が圧縮されて氷となり，長い年月をかけて厚く成長し，ゆっくりと流れ出したものが（　エ　）である。

（　エ　）は重いため，その侵食作用や運搬作用は流水よりも強く，$_b$<u>カールやモレーン</u>などの特徴的な地形を形成する。

(1)　空欄ウ，エに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ウ：氷床　　　エ：流氷

②　ウ：氷床　　　エ：氷河

③　ウ：万年雪　　エ：氷床

④　ウ：万年雪　　エ：氷河

(2)　下線部ｂについて，カールの説明として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　U字状の断面をもつ侵食地形

②　山の斜面をスプーンで削ったような侵食地形

③　氷河の端に堆積した礫によって作られる土手のような地形

④　氷河が山地から平野に出たところに礫が堆積した扇形の地形

(3)　下線部ｂについて，モレーンを形成する礫の説明として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　粒径は揃っており，形は角ばっている。

②　粒径は揃っており，形は丸みを帯びている。

③　粒径は揃っておらず，形は角ばっている。

④　粒径は揃っておらず，形は丸みを帯びている。

第 10 講　地質調査と地質図
PART1 走向と傾斜

目標　地層や断層の面の向きの表現と測定のしかたについて説明できる。

Chapter1　走向と傾斜

地層や断層の向きを知ることは，地質調査の基本です。ここでは，そのような面の向きの表現と測定のしかたについて学びましょう。

走向と傾斜とは

・走向とは

地層や断層の面〔以下では地層面と表す〕と水平面との交線〔走向線〕の方向。

・傾斜とは

地層面の最大傾斜の方向と，地層面が水平面となす角の大きさ。

走向と傾斜の表現法

・走向の表し方

走向線が北から東西どちらに何度ずれているかを記す。

（例）

走向線が北から 30°西にずれているとき

……（N30° E / N30° W）

知っておこう

走向は，左のような表記を用いずに「南北」や「北西－南東」などと表されることもあります。

・傾斜の表し方

地層面の最大傾斜の方向は，走向線と直交する断面に見える地層面の向きである。

傾斜の向きは，この最大傾斜の方向を 8 方位で表す。

傾斜の大きさは，走向線と直交する断面における水平面と地層面のなす角を記す。

（例）

地層の最大傾斜の方向が北東で，傾斜の大きさが 30°のとき

覚えておこう

4 方位
360°を北，東，南，西の 4 つに（90°ずつに）分けた方位の表し方。
8 方位
4 方位に加えて北東，南東，南西，北西を用いることで，360°を 8 つに（45°ずつに）分けた方位の表し方。

……（30° NE / 30° NW / 30° SE / 30° SW）

走向と傾斜の測定法

・クリノメーター

地層面の走向と傾斜を測定するための器具。薄い直方体に磁針，垂針〔おもり〕，水準器などのついた構造が基本。

・走向の測定法

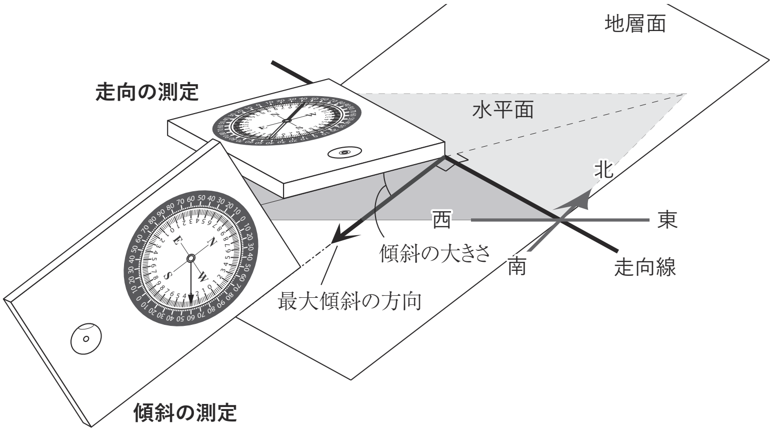
水準器を用いてクリノメーターを水平に保ちながら，クリノメーターの長辺が地層面に当たるようにする。このときの長辺の向きが走向であり，磁針の指す（外側 / 内側）の目盛が走向の角度である。

・傾斜の測定法

走向線と垂直な向きにクリノメーターを立てて，クリノメーターの長辺が地層面に当たるようにする。このときの長辺の下がる向きが傾斜の向きであり，垂針の指す（外側 / 内側）の目盛が傾斜の大きさである。

知っておこう

クリノメーターを水平に保つことで，クリノメーターを水平面とみなすことができます。そのクリノメーターの長辺が地層面に当たっているとき，長辺は地層面と水平面との交線，すなわち走向線になっているのです。



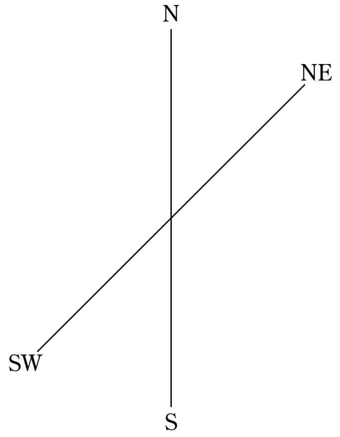
まとめ

・地層や断層の面の向きは，走向と傾斜を用いて表される。
・走向線が北から 60° 東にずれているとき，______と表す。
・傾斜が 45° NW と表されているとき，地層の最大傾斜の方向は______で，傾斜の大きさが 45° である。
・走向や傾斜は，____________を用いて測定される。

Chapter2　演習問題

ここでは，クリノメーターを用いた走向の測定法について確認しましょう。以下ではスマートフォンのコンパス〔方位磁針〕アプリを利用します。方位磁石をもっている人は，それを小さな長方形の板に固定したものを用いてもよいでしょう。

問題(1)　次の図は，南北方向を表す直線N－Sと，北東－南西方向を表す直線NE－SWを示したものです。下の**操作**1～3を行ってください。テキストを画面上で見ている人は，紙に写して操作してみましょう。**操作**3によって，コンパスアプリの「北」はスマートフォンの画面上でどちら向きに回転したように見えるでしょうか。「時計回り」または「反時計回り」で答えましょう。



＜操作＞

1. 机の上で，上の図のN－Sと書かれた直線にスマートフォンの右側の長辺を合わせて置いてください。
2. 図のNの方向がコンパスアプリの北と合うように，テキストにスマートフォンをのせたまま回転させてください。
3. テキストは動かさず，図のNE－SWと書かれた直線に右側の長辺を合わせるように，スマートフォンを時計回りに回転させてください。

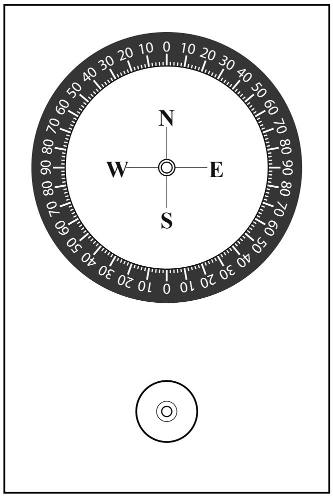
ここがPOINT

机が鉄でできていたり，近くに強い磁石があったりする場合，コンパスアプリが正しく動作しないことがあります。その場合は，場所を変えて試してみてください！

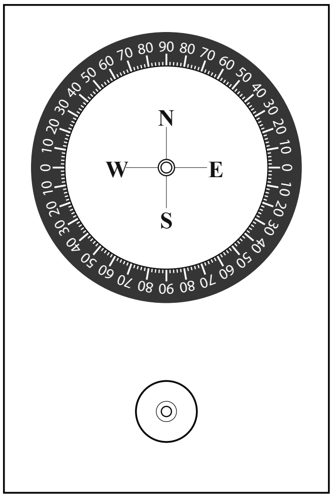
問題⑵　**問題⑴**の結果を参考にして，次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

走向が北から時計回りにθだけずれるとき，クリノメーターの磁針の「北」は（時計回り / 反時計回り）に（θ / $90°-\theta$）だけずれるように見える。そのため，磁針の指す向きや目盛を文字盤から読み取るだけで走向がわかるようにするためには，次の図の（a / b / c / d）のような文字盤にしておけばよい。

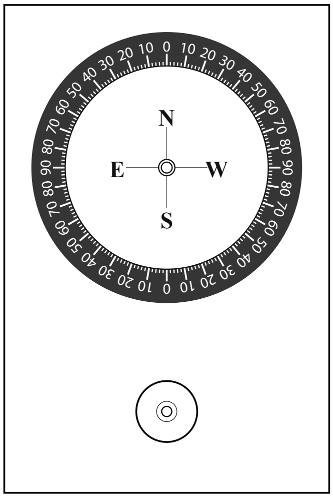
a



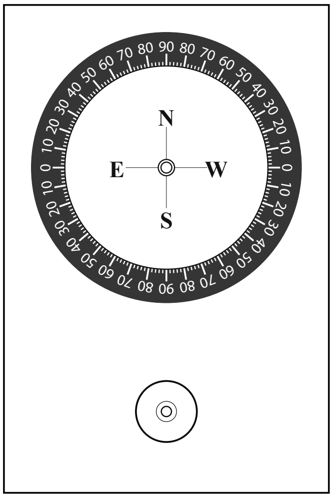
b



c



d



第10講　PART1　確認問題

問1　次の文章を読み，下の問いに答えよ。

走向とは地層や断層の面と（　ア　）面との交線（走向線）の方向のことである。また，傾斜の大きさは地層面の（　イ　）傾斜の方向が（　ア　）面となす角の大きさである。

(1)　空欄ア，イに当てはまる語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ア：水平　　イ：最小　　②　ア：水平　　イ：最大

③　ア：鉛直　　イ：最小　　④　ア：鉛直　　イ：最大

(2)　走向線が北から 60°東にずれているとき，走向の表し方として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　N60° E　　②　E60° N

③　60° NE　　④　60° EN

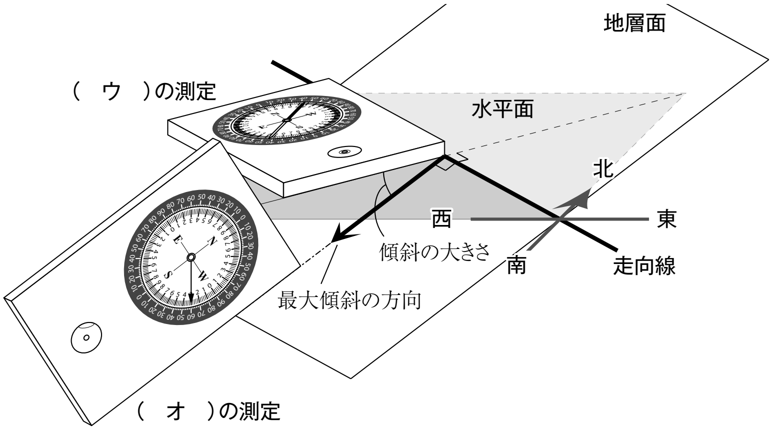
(3)　地層の最大傾斜の方向が南西で，傾斜の大きさが 15°のとき，傾斜の表し方として適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　S15° W　　②　W15° S

③　15° SW　　④　15° SN

問2　次の文章を読み，下の問いに答えよ。

図は，クリノメーターによる走向と傾斜の測定のようすを表している。水準器を用いてクリノメーターを水平に保ちながら，クリノメーターの長辺が地層面に当たるようにしたとき，長辺の向きが（　ウ　）で，（　エ　）の指す外側の目盛が（　ウ　）の角度である。また，走向線と垂直な向きにクリノメーターを立てて，クリノメーターの長辺が地層面に当たるようにしたとき，長辺の下がる向きが（　オ　）の向きで，（　カ　）の指す内側の目盛が（　オ　）の大きさである。



(1)　文中および図中の空欄ウ～カに当てはまる語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ウ：走向　エ：磁針　オ：傾斜　カ：垂針
②　ウ：走向　エ：垂針　オ：傾斜　カ：磁針
③　ウ：傾斜　エ：磁針　オ：走向　カ：垂針
④　ウ：傾斜　エ：垂針　オ：走向　カ：磁針

PART2 ルートマップ

目標　地質調査によって得られた地層面の走向・傾斜を，ルートマップ上に正しく記録することができる。

Chapter1　地質調査とルートマップ

地表の多くの部分は植物や建物などに覆われており，地表に分布している岩石を観察できる場所は限られています。ここでは，地質調査の方法や結果の記録法について学びましょう。

地質調査の基本

・地質調査の目的

過去の環境変動や地殻変動の歴史を推定するために，地層や岩石の分布や内部構造を知ること。

・地質調査を行う際の注意

地表に岩石が露出する場所は，海岸や川沿い，切り通しなどの切り立った崖が多い。頭を保護するための帽子やヘルメットをかぶるほか，岩石や生物によるけがを防止するために長そで・長ズボン・軍手を着用することが望ましい。

知っておこう
地質調査は，資源探査，建物の建設や住宅地の開発，そしてトンネルや橋などの工事を行う際の基礎調査としても重要です。左に書かれているのは，理学的な立場での目的といえるでしょう。

ルートマップ

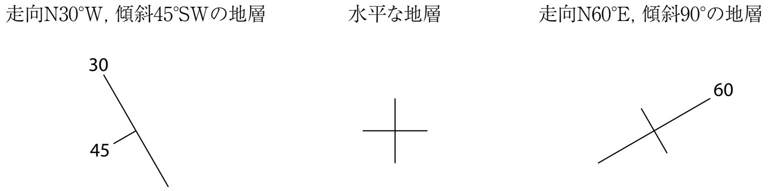
・ルートマップとは

地質調査で得られた情報を，地形図上に記号を用いて記したもの。おもに次のような情報が記される。

- 露頭の場所
- 露出している岩石の種類
- ［堆積岩や断層の場合］走向と傾斜

・走向と傾斜の記号

長い線分で走向，短い線分で傾斜の向きを表す。また，走向と傾斜の角度を添える。



知っておこう

走向が南北のときは N─S（または NS）と表し，記号の中の走向の数値は 0 とします。

また，左の記号は走向が正しい向きとなるように記されます。そのため，図から読み取れる走向の数値は省略されることもあります。

・ルートマップの利用

ルートマップからは，調査を行った場所における地層や岩石の分布を読み取ることができる。それをもとに地質断面図や地質柱状図を描き，調査を行った場所の地質構造を推定することができる。

地層の面的な広がりを確認するためには，複数のルートで地質調査を行ってルートマップを作成することが有効となる。

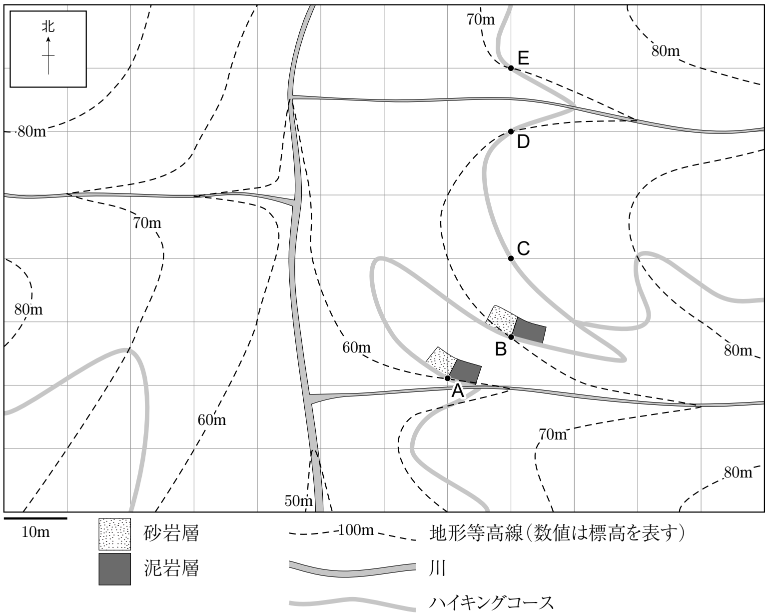
まとめ

・ルートマップは，地質調査で得られた情報を，地形図上に記号を用いて記したものである。

・地層面の走向が N45° E，傾斜が 60° NW のとき，ルートマップ上には__________と記録される。

Chapter2　演習問題

　次の図は，A 地点からハイキングコースに沿って北上しながら地質調査を行った結果の一部を表しています。ここでは，この地域における地質調査を例にして，ルートマップの描き方や活用の方法について確認しましょう。



問題⑴　A 地点ではハイキングコースの北側に岩石が露出しており，砂岩層と泥岩層の境界が観察されました。クリノメーターを用いて測定したところ，この地層境界面の走向は N—S，傾斜は 45° W でした。記号を用いて，この測定結果を図中に描き込んでください。描き込むのが難しい場合，下の余白に描いてもかまいません。

問題⑵　B地点でもハイキングコースの北側に岩石が露出しており，A地点と同じ砂岩層と泥岩層の境界が観察されました。また，この地層境界面の走向はN—S，傾斜は45° Wでした。次の文章中の(　　)について,正しいものを選びましょう。また，[　　]について,正しいものをすべて選びましょう。

　地層境界面の走向は，その面と（地表面 / 水平面）の交線の向きを表す。この交線を走向線といい，走向線上では地層境界面の標高が一定だと考えることができる。

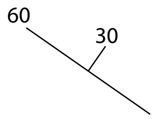
　B地点において境界面の走向がN—Sであったことから，B地点を通る（南北 / 東西）方向の直線上では地層境界面の標高がB地点と同じだといえる。よって，ハイキングコースをさらに北上したC～E地点に地層が露出していたとすると，B地点と同じ地層境界面が観察されると予想されるのは［C地点 / D地点 / E地点］である。

第 10 講　PART2　確認問題

問 1　次の文章を読み，下の問いに答えよ。

地質調査で得られた露頭の場所，露出している岩石の種類，a地層の走向や傾斜などの情報を地形図上に記号を用いて表したものを（　ア　）という。地質調査を行うことで地層や岩石の分布や内部構造を知ることができる。

(1)　下線部 a について，次の記号が表す情報として最も適当なものを，あとの①～④のうちから一つ選べ。



①　走向 N30° E，傾斜 60° NW
②　走向 N30° E，傾斜 60° NE
③　走向 N60° W，傾斜 30° NW
④　走向 N60° W，傾斜 30° NE

(2)　空欄アに当てはまる語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ハザードマップ　　②　ルートマップ
③　ロードマップ　　④　ドライブマップ

＜ Note ＞

PART3 地質断面図と地質柱状図

目標　地質断面図や地質柱状図のもつ特徴について説明することができる。

Chapter1　地質断面図と地質柱状図

ルートマップは，地質調査の結果を示す「生」に近いデータです。ここでは，ルートマップをもとにして地質断面図と地質柱状図を描き，岩石の分布の広がりを推定する方法について学びましょう。

知っておこう
断面図と柱状図は，それぞれ地質断面図，地質柱状図とも呼ばれます。

地質断面図

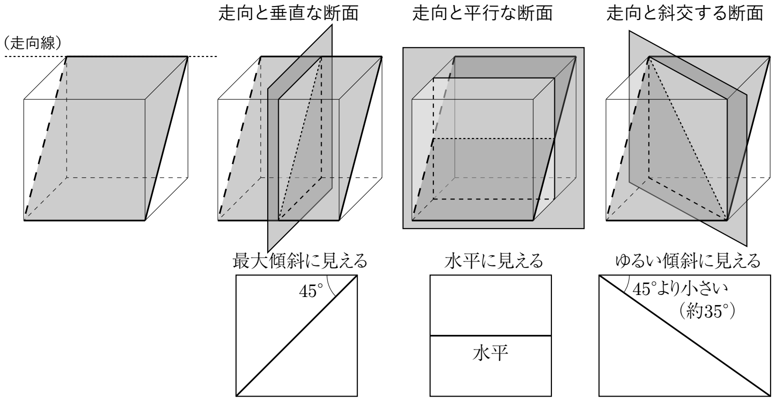
・地質断面図の役割

ルートマップ…限られた地点で「上から」見たときの地層の見え方を表す。

地質断面図……「横から」見たときの地層の広がりを表す。

・地層の広がりの読み取りに適した断面

地層の傾きは，切断面の向きによって異なって見える。地層の傾斜は最大傾斜の方向，つまり走向と（平行な / 直交する）向きなので，その向きの地質断面図を描けば，地層の傾斜を正しく読み取れる。



地質柱状図

・ **地質柱状図の役割**

地質断面図……「横から」見たときの地層の広がりを表す。

地質柱状図……地層面と垂直な向きの地層の積み重なり方を表す。

・ **地質柱状図の利用**

地質柱状図は，地層の特徴だけでなく，地層の厚さを正しく表している。地質柱状図を描くことで，時代とともに地層がどのように積み重なってきたかを確認し，過去の環境変動のようすを推定することができる。

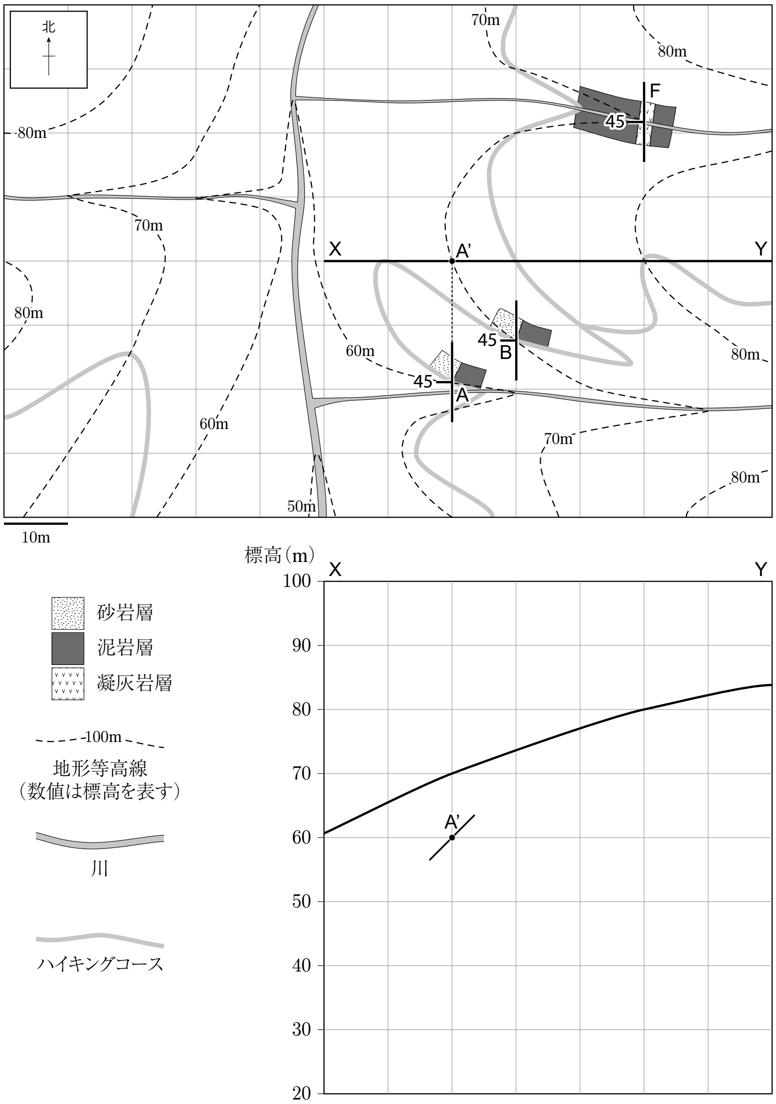
また，離れた地域の地質柱状図に同一の（断層 / かぎ層）が含まれていれば，それを用いて地層の対比を行うこともできる。

まとめ

・地質断面図は，「横から」見たときの地層の広がりを表す。
・地層の傾斜を正しく読み取れる地質断面図を描くためには，走向と＿＿＿＿＿＿向きのものを描くとよい。
・地質柱状図は，地層面と垂直な向きの地層の積み重なり方を表し，地層の厚さを正しく表している。
・地質柱状図は，過去の環境変動の推定や，離れた地域の地層の対比などに利用される。

Chapter2　演習問題

　次の図は，A 地点からハイキングコースに沿って北上しながら地質調査を行った結果の一部と，図中の X—Y に沿った地形断面図を表しています。ここでは，この地域における地質調査を例にして，ルートマップをもとに地質断面図と地質柱状図を描く方法について確認しましょう。



問題(1)　A地点では，砂岩層と泥岩層の境界が観察されました。標高60mのA地点において境界面の走向がN—Sであることから，その真北にあたるA′地点でもこの境界面は標高60mに存在するはずです。また，X—Yは走向と垂直な方向なので，X—Yに沿った断面では境界面の傾斜が正しく表されるはずです。これらのことをもとにして，断面図上にはA′地点における境界面のようすが示されています。

この例にしたがって，B地点における砂岩層と泥岩層の境界と，F地点における凝灰岩層を，断面図上に描き加えてください。ただし，ここでは凝灰岩層を線として表してかまいません。

また，図の範囲でこれらは一定の傾斜を保ったまま広がっていると考えて，描いた線を地表より下の全体に延長してください。

問題(2)　問題(1)の結果をもとに地質柱状図を描くことを考えます。次の文章中の(　　)について,正しいものを選びましょう。ただし，$\sqrt{2}=1.4$とします。

地質柱状図を描くためには，（示相化石 / 堆積構造）などを用いて地層の上下を判定するとともに，地層の正しい厚さを求める必要がある。

ここでは地層の上下が逆転していないものとすると，調査した範囲の地層は（砂岩 / 泥岩）の上に（砂岩 / 泥岩）が積み重なっている。また，地層の正しい厚さは地層境界面と（平行 / 垂直）な向きに測定することに注意すると，凝灰岩層と砂岩層との間には泥岩層が（10m / 14m / 20m / 28m）存在する。これらのことから，調査した範囲の地質柱状図を描くことができる。

第10講 PART3 確認問題

問1 次の文章を読み，下の問いに答えよ。

ルートマップをもとにして断面図と柱状図を描き，岩石の分布の広がりを推定することができる。地層の傾斜を正しく読み取るためには，走向と（ ア ）な向きの（ イ ）を描く必要がある。（ ウ ）は地層面と（ エ ）な向きの地層の積み重なり方を表し，地層の特徴や厚さを正しく知ることができるので，過去の環境変動のようすを推定する手がかりとなる。離れた地域の（ オ ）に共通する地層を用いて地層の対比を行うことができる。このような地層を（ カ ）という。

(1) 空欄ア，イに当てはまる語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① ア：平行 イ：断面図
② ア：平行 イ：柱状図
③ ア：垂直 イ：断面図
④ ア：垂直 イ：柱状図

(2) 空欄ウ，エに当てはまる語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① ウ：断面図 エ：平行
② ウ：断面図 エ：垂直
③ ウ：柱状図 エ：平行
④ ウ：柱状図 エ：垂直

⑶　空欄オ，カに当てはまる語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　オ：断面図　　カ：かぎ層

②　オ：断面図　　カ：正断層

③　オ：柱状図　　カ：かぎ層

④　オ：柱状図　　カ：正断層

PART4 地質図

目標　地層面の走向・傾斜と地質図上の地層境界線を対応付けることができる。

Chapter1　地質図

　地表の多くの部分は植物や建物などに覆われており，地表に分布している岩石を実際に観察できる場所は限られています。ここでは，地図上で見たときの地層や岩石の広がりを表す方法として，地質図について学びましょう。

知っておこう
地質図は，地質平面図とも呼ばれます。

地質図

・地質図の役割

ルートマップ…限られた地点で「上から」見たときの地層の見え方を表す。

地質断面図……「横から」見たときの地層の広がりを表す。

地質柱状図……地層面と垂直な向きの地層の積み重なり方を表す。

地質図…………「上から」見たときの地層の広がりを表す。

・地質図に示される代表的な情報

いずれも，地表に分布する植物や建物などを取り去ったときのようすを表す。

地層境界線……異なる地層や岩石の境界が地表でどのように見えるかを表す線が描かれる。露頭線とも呼ばれる。

分布する岩石…地層や岩石の分布が色や記号によって示される。

断層の露頭線…断層面が地表でどのように見えるかを表す線が描かれる。

・地質図の描き方

まず，ルートマップに描かれた走向・傾斜の情報をもとに，各標高の走向線を描く。このとき，走向と直交する向きの断面図を描きながら考えると，露頭のない標高における走向線の位置がわかりやすい。

次に，各標高の走向線と，その標高の地形等高線との共有点に印をつける。さらに，つけた印をなめらかに結ぶことで地層境界線を描く。

これを図中のすべての地層境界線についてくり返し，それらの間を地層ごとに塗り分けていく。

・地質図の読み取り方

まず，地層境界線と，ある標高の地形等高線との共有点に印をつける。それらをすべて通る直線が，その標高の走向線である。

これを図中のすべての標高についてくり返し，走向線を描く。これらの走向線の向きが走向である。

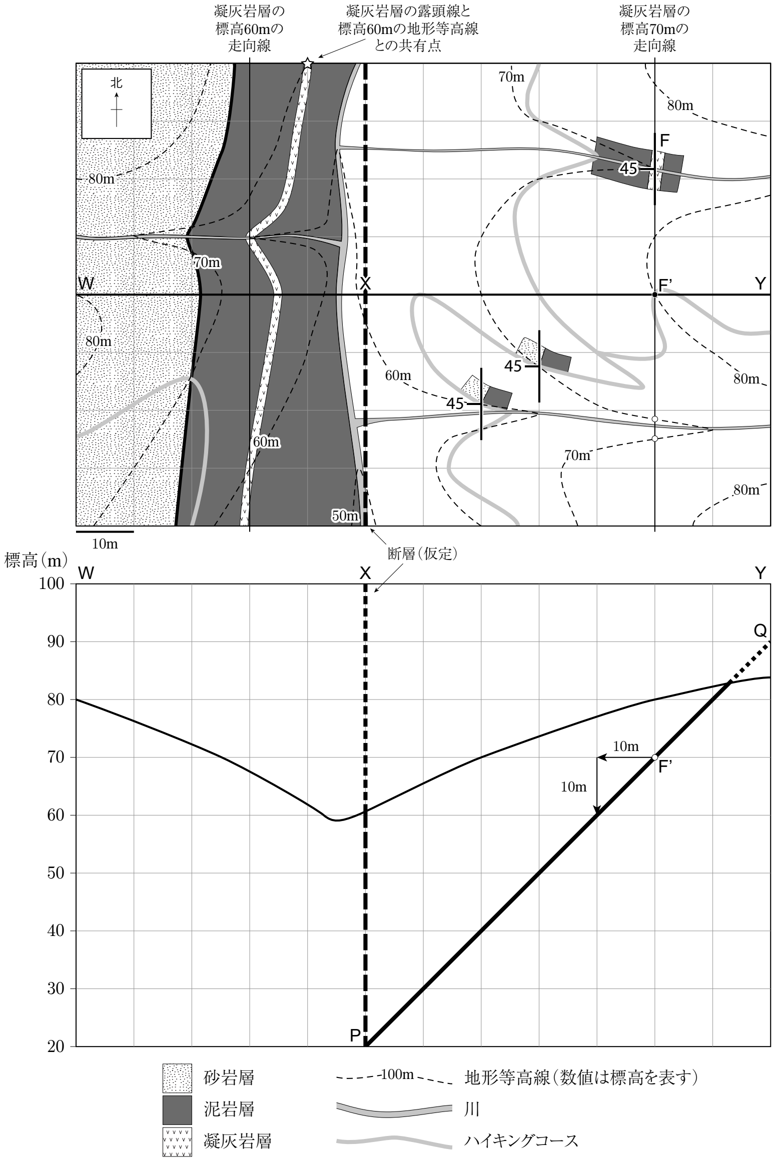
次に，走向線の間隔と標高差との関係をもとに地層の傾斜を求める。このとき，走向と直交する向きの地質断面図を描きながら考えると傾斜の大きさがわかりやすい。

まとめ

- 地質図は，「上から」見たときの地層の広がりを表す。
- ルートマップをもとに地質図を描くときも，既に描かれた地質図を読み取るときも，各標高の＿＿＿＿＿を描くことが基本となる。
- 地層の傾斜の大きさを考えるためには，地質図とあわせて，走向と＿＿＿＿する向きの地質断面図を描くとよい。

Chapter2　演習問題

次の図は，川の東側で地質調査を行って得られたルートマップと，川の西側で既に描かれた地質図〔これらを以下では平面図とします〕，さらに図中の W—X—Y に沿った地形断面図を表しています。ここでは，この地域における地質調査を例にして，地質図の描き方と読み取り方について確認しましょう。



問題⑴　ここでは，川の東側について考えます。

標高70mの**F**地点において凝灰岩層の走向がN―Sであることから，凝灰岩層の標高70mの走向線は図のように描かれます。この走向線と標高70mの地形等高線との共有点〔平面図中の○〕では凝灰岩層が標高70mに位置しています。

また，走向線と**X―Y**との交点にあたる**F′**地点でも，凝灰岩層は標高70mに位置しています〔断面図中の○〕。傾斜は45° Wなので，**F**地点で観察された凝灰岩層は断面図では**P―Q**のように描かれ，西に10m移動すると凝灰岩層の標高は10m下がります。

以上のことをもとにして凝灰岩層の標高60mと80mの走向線を描き，地形等高線との共有点をそれぞれ×と◎で平面図上に示してください。存在しないときは「なし」と答えましょう。

さらに，図中のすべての○×◎を通るように，凝灰岩層の露頭線を〔断面図と同様に一本の線で〕描いてください。

ここがPOINT
露頭線は地形等高線と○×◎以外の共有点をもたないことに注意しましょう。

問題⑵　凝灰岩層について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

断層の西側に着目しよう。露頭線と標高60mの地形等高線との共有点をもとにして，標高60mの走向線を描くことができる。露頭線と標高70mの地形等高線との共有点は1点〔平面図中の☆〕しかないが，標高70mの走向線が標高60mの走向線と平行だと考えることで，標高70mの走向線を描くことができる。また，**問題**⑴と同様にして凝灰岩層を断面図に描くことができる。

断層図上で，川の西側と東側の凝灰岩層はつながらない。**X**地点を通り走向がN―S，傾斜が90°の断層があったと仮定すると，この断層によって断層の（西側 / 東側）が（西側 / 東側）に対して（20m / 40m / 60m / 80m）上昇したと考えられる。

第10講 PART4 確認問題

問1 次の問いに答えよ。

(1) 地層面と垂直な向きの地層の積み重なり方を表すものとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① ルートマップ　② 断面図
③ 柱状図　④ 地質図

(2) 上から見たときの地層の広がりを表すものとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① ルートマップ　② 断面図
③ 柱状図　④ 地質図

(3) 限られた地点で上から見たときの地層の見え方を表すものとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① ルートマップ　② 断面図
③ 柱状図　④ 地質図

(4) 横から見たときの地層の広がりを表すものとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① ルートマップ　② 断面図
③ 柱状図　④ 地質図

問２　次の文章を読み，下の問いに答えよ。

地質図には，異なる地層や岩石の境界の地表での見え方を示す（　ア　）が描かれている。地層や岩石の分布は色や記号によって表される。

（　ア　）と，ある標高の地形等高線とのすべての交点を結ぶと，その標高の（　イ　）になる。地質図上のすべての標高について（　イ　）を描くと，それらの向きから（　ウ　）がわかる。（　イ　）の間隔と標高差との関係から地層の（　エ　）を求めることができる。

(1)　空欄ア，イに当てはまる語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ア：走向線　　　イ：地層境界線
②　ア：走向線　　　イ：等圧線
③　ア：地層境界線　イ：走向線
④　ア：地層境界線　イ：等圧線

(2)　空欄ウ，エに当てはまる語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ウ：走向　エ：傾斜
②　ウ：走向　エ：年代
③　ウ：傾斜　エ：走向
④　ウ：傾斜　エ：年代

第 11 講　地球の歴史

PART1 放射性年代

目標　放射性年代を測定する原理について，放射性同位体の例を挙げて説明できる。

Chapter1　放射性年代

地学基礎で学んだように，産出する化石の変化をおもな基準として地球の年代は区分されています。ここでは，その年代を数値で表すための方法について学びましょう。

放射性同位体

・**放射性同位体**

原子核が自発的に放射線を放って別の原子核になる現象を原子核の**崩壊**，原子核が放射線を放つ性質を**放射能**と呼ぶ。また，放射能をもつ同位体を**放射性同位体**と呼ぶ。

・**放射性同位体の半減期**

放射性同位体は，一定の時間ごとに一定の割合で他の原子核に崩壊していく性質をもつ。放射性同位体が崩壊によって元の量の半分になるまでの時間を**半減期**といい，温度や圧力などの条件によらず一定の値をとることが知られている。

放射性年代

・**放射性年代と相対年代**

放射性年代…放射性同位体を用いて測定された年代。試料の形成が現在から何年前のことかを数値として表す。

相対年代……おもに化石を用いることで調べられた年代。何年前かはわからないが，前後関係は明らかにできる。

・放射性年代の測定原理

岩石が形成されてから現在までに周囲との元素のやり取りを行わなかったとする。

このとき，岩石中の放射性同位体は崩壊により半減期にしたがって減少し，崩壊の結果として生じる安定同位体は増加していく。そのため，放射性同位体や安定同位体の存在比を調べれば，岩石が形成されてから現在までの時間が推定できる。

・年代測定に用いられる代表的な放射性同位体

元の放射性同位体	生じる安定同位体	半減期
^{238}U	^{206}Pb ※1	4×10^9 年〔40億年〕
^{40}K	^{40}Ca, ^{40}Ar ※2	1×10^9 年〔10億年〕
^{14}C	^{14}N	6×10^3 年〔6000年〕

※1　^{238}U から14段階の崩壊を経て最終的に生じる安定同位体。

※2　89%の確率で ^{40}Ca，11%の確率で ^{40}Ar が生じる。

知っておこう

U〔ウラン〕は安定同位体をもたない元素であり，^{238}U以外の放射性同位体として

^{235}U〔半減期7.0億年〕
^{234}U〔半減期25万年〕

が天然に存在します。

また，地球の熱源の1つとして重要なTh〔トリウム〕も安定同位体をもたず，放射性同位体の

^{232}Th〔半減期140億年〕
^{230}Th〔半減期7.5万年〕

が天然に存在します。

実際の放射性年代の測定では，これらの放射性同位体のうちいくつかの存在比を用いることなどにより，幅広い年代の試料の放射性年代が求められています。

まとめ

- 放射性同位体を用いて測定された年代を放射性年代といい，試料の形成が現在から何年前のことかを数値として表す。
- 放射性同位体が崩壊によって元の量の半分になるまでの時間を________といい，温度や圧力などの条件によらず一定の値をとる。
- 放射性年代を求めるためには，放射性同位体や安定同位体の存在比を調べる。
- 年代測定には，崩壊して______となるウランの放射性同位体や，崩壊して窒素となる______の放射性同位体などが用いられる。

Chapter2　演習問題

ここでは，放射性年代について確認しましょう。

問題⑴　炭素の放射性同位体を用いた年代測定について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。ただし，炭素の放射性同位体の半減期を 6000 年とします。また，大気中の炭素の同位体の存在比は時代によらず現在と同じであったとします。

天然に存在する炭素の同位体のうち，ごく微量に含まれる（^{12}C / ^{13}C / ^{14}C）は放射性同位体である。

陸上に生息している植物は，大気中の二酸化炭素を取り込んで植物体を形成している。植物が生きている間は植物体を構成する原子がつねに入れ替わっており，炭素の同位体の存在比は一定である。

この植物の葉が堆積物中に埋没し，大気や地下水などから隔離された状態になったとする。また，簡単のために微生物による分解は考えないものとする。このとき，葉の中に含まれる炭素の安定同位体の量は時間とともに（増加し / 減少し / 変化せず），放射性同位体の量は時間とともに（増加する / 減少する / 変化しない）ことが予想される。

ある堆積物中に含まれる植物の葉について炭素の同位体を調べたところ，放射性同位体の存在比が現在の大気中の存在比とくらべて 4 分の 1 であった。このとき，植物の葉が大気や地下水などから隔離されたのは，現在から約（1500 年 / 3000 年 / 12000 年 / 24000 年）前のことだと推定できる。

ここがPOINT
半減期は，放射性同位体が崩壊によって元の量の半分になるまでの時間です！

問題⑵　火成岩の放射性年代について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

火成岩の放射性年代を測定する方法の 1 つは，^{40}K を用いた年代測定である。この方法はカリウム－アルゴン法と呼ばれており，岩石または鉱物に含まれる半減期 10 億年の ^{40}K と，その崩壊によって生じる ^{40}Ar の比を考える。

カリウム－アルゴン法による分析を行うためには，放射性同位体である ^{40}K や，その崩壊によって生じる安定同位体である ^{40}Ar が岩石中に多く含まれていることが望ましい。そのため，（かんらん石や石英 / 黒雲母やカリ長石）を多く含んでおり，形成されてからの時間が（数十万年以上 / 数万年以内）の岩石が，分析対象として適している。

第 11 講　PART1　確認問題

問 1　次の文章を読み，下の問いに答えよ。

原子核が放射線を放つ性質を（　ア　）という。また，（　ア　）をもつ同位体を（　イ　）と呼ぶ。放射性同位体は，一定の時間ごとに一定の割合で他の原子核になる性質をもつ。

（　イ　）が元の量の半分になるまでの時間を半減期といい，a温度や圧力などの条件によらず一定の値をとる。

(1)　空欄ア，イに当てはまる語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ア：放射能　　イ：放射性同位体
②　ア：放射能　　イ：安定同位体
③　ア：崩壊　　イ：放射性同位体
④　ア：崩壊　　イ：安定同位体

(2)　下線部 a について，^{14}C の半減期として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　60 年　　②　6000 年
③　60 万年　　④　6 億年

問２ 次の文章を読み，下の問いに答えよ。

　岩石中の放射性同位体は，崩壊により半減期にしたがって（　ウ　）し，安定同位体は（　エ　）していく。放射性同位体や安定同位体の存在比を調べることにより，その岩石の形成時期を推定することができる。

(1) 空欄ウ，エに当てはまる語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① ウ：増加　エ：増加
② ウ：増加　エ：減少
③ ウ：減少　エ：増加
④ ウ：減少　エ：減少

(2) 放射性同位体である ^{238}U が崩壊して最終的にできる安定同位体は何か。最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① ^{14}N　② ^{40}Ca
③ ^{40}Ar　④ ^{206}Pb

PART2 全球凍結

目標　地球が全球凍結状態になったと考えられる根拠について説明できる。

Chapter1　全球凍結

現在の地球は，南北半球の高緯度にのみ氷床が存在する状態です。地球史のほとんどの期間には氷床が存在しなかったようですが，現在以上に氷床の広がっていた時代もあったと考えられています。ここでは，そのような時代について見ていきましょう。

全球凍結の理論

・地球の全球熱収支

地球が放射する赤外線は，表面温度が高いほど（多い ／ 少ない）。地球の表面は，吸収する太陽放射と放射する地球放射がちょうどつり合う温度に保たれている。

・氷床の発達とアルベドの変化

氷床は大陸や海洋とくらべて（白っぽく ／ 黒っぽく），太陽放射をよく反射する。そのため，寒冷化によって氷床が発達すると，アルベドが（大きく ／ 小さく）なる。

知っておこう

太陽放射のうち反射される量の占める割合を**アルベド**といいます。

・地球の気候の安定状態

同じ量の太陽放射に対して，

	アルベド	吸収する太陽放射	表面温度
無氷床	小	大	高
部分的に氷床が存在	中	中	中
地球全体に氷床が存在	大	小	低

のうち複数の状態が安定になり得る。現在の地球は，両極を中心として部分的に氷床が存在する状態である。

地球史における全球凍結

・**ドロップストーン**

陸域で削り取った礫を取り込んだ氷山が海上で融けると，通常は遠洋性の堆積物しか堆積しない海底に礫が供給される。この礫をドロップストーンという。

→ドロップストーンは，堆積した場所が氷山の到達するような寒冷な環境であったことを示す。

・**原生代の全球凍結**

原生代の初期〔約 23 ～ 22 億年前〕と後期〔約 7 ～ 6 億年前〕の地層からは，ドロップストーンなどの極端に寒冷な環境であったことを示す証拠が見つかっている。

これらの証拠が当時の赤道域を含む世界各地の地層から発見されていることから，これらのごく限られた時期には地球表層が低緯度まで氷に覆われた**全球凍結**の状態であったと考えられている。

まとめ

・地球の表層環境は，氷に覆われてアルベドが大きくなると吸収する太陽放射と放射する地球放射がともに＿＿＿＿状態で安定となり得る。

・地球史上，＿＿＿代の初期と後期の限られた期間にのみ，地球の表層が低緯度まで氷に覆われたと考えられている。この状態を＿＿＿＿という。

・全球凍結が起こったと推定される根拠の 1 つは，氷山が融けるときに遠洋域の海底に落としたと考えられる＿＿＿＿＿＿＿＿＿が当時の赤道域の地層から見つかったことである。

Chapter2　演習問題

ここでは，全球凍結について確認しましょう。

問題⑴　地球史における全球凍結について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

地球が形成されてから現在までの間，表層の環境は基本的に水が液体で存在できるような温暖な状態に保たれてきたと考えられている。地球表層に大規模な氷床が存在する時代を氷河時代といい，氷河時代は地球史のうち限られた期間だけであった。そのような氷河時代のうち，低緯度地域まで氷床が発達したと考えられているのが原生代の初期にあたる（約 46 ～ 45 億年前 / 約 23 ～ 22 億年前）と後期にあたる（約 7 ～ 6 億年前 / 約 3 ～ 2 億年前）の一部の期間である。

遠洋性堆積物が寒冷な環境で堆積したことを示す証拠の一つがドロップストーンである。これは細粒の堆積物の中に含まれる（円みを帯びた / 角ばった）礫であり，氷河が大陸で削り取った礫が海に供給されたものだと考えられる。

地球表層がすべて氷に覆われる全球凍結の状態は，現在の環境からは想像しがたい。しかし，全球凍結を仮定することで，ドロップストーンのような堆積物のほか，生物活動がほぼ停止したことを示すような同位体の記録などを統一的に説明することができる。

問題⑵　原生代の地球表層の環境について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

原生代初期の全球凍結の後には，大気中の酸素濃度が現在の 100 分の 1 程度まで上昇したと考えられている。これは，（シダ植物 / シアノバクテリア）などの遺がいが分解されずに堆積物中へと隔離されたことによる。大気中の酸素が増加することで，上空に（オゾン層 / オーロラ）が形成され始めた。

また，原生代後期の全球凍結の後にも大気中の酸素濃度が上昇し，現在の 10 分の 1 程度に達したと考えられている。大気と海洋における酸素濃度が上昇することは，生物の生息場所の拡大につながったとされる。

第11講　PART2　確認問題

問１　次の文章を読み，下の問いに答えよ。

　地球全体の熱収支を考えると，地球の表面は，太陽放射と（　ア　）放射がちょうどつり合う状態に保たれている。太陽放射の総量のうち反射される量の割合を $_a$アルベドという。

　地球は，（　イ　）の初期と後期に極端に寒冷化し，表層が $_b$低緯度地帯まで氷に覆われた状態であったと考えられている。

(1)　空欄アに入る語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　宇宙　　②　地球
③　大陸　　④　海洋

(2)　下線部ａについて，地球の両極と赤道付近を比べた場合の説明として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　両極の方が赤道付近よりも大きい。
②　赤道付近の方が両極よりも大きい。
③　両極と赤道付近で同じである。
④　大小関係は経度により異なる。

(3)　空欄イに入る語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　原生代　　②　古生代
③　中生代　　④　新生代

⑷　下線部ｂについて，地球のこのような状態を何というか。
最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　万年雪　　②　氷河時代

③　ドロップストーン　　④　全球凍結

PART3 顕生代の特徴的な環境変動

目標　海洋無酸素事変および天体衝突に特徴的な堆積物について説明できる。

Chapter1　顕生代の特徴的な環境変動

地学基礎では，顕生代にさまざまな生物が現れては絶滅したことを学んでいます。ここでは，顕生代における特徴的な環境変動について見ていきましょう。

海洋無酸素事変

・海洋無酸素事変とは

有機物に富んだ層状の黒い泥岩〔黒色頁岩〕が広い海域で形成されたできごとのこと。

知っておこう

泥岩のうち，層状に割れやすい性質をもつものを頁岩といいます。

・黒色頁岩の成因

有機物に富む

……表層から沈降してきた有機物の遺がいが分解されていない

……海水中に分解者がいなかった

層状である

……堆積物が海底の生物によって乱されていない

……海底に大型生物がいなかった

→どちらのことからも，海水中に酸素がない〔無酸素〕か，非常に少ない〔貧酸素〕環境だったと考えられる。

・顕生代の海洋無酸素事変

ペルム紀・三畳紀境界には海洋無酸素事変が起こったことが知られており，古生代末の大量絶滅と関連付けられている。

また，白亜紀には海洋無酸素事変が数百万年に 1 回という短い周期で起こり，海洋生物の絶滅につながったと考えられている。

天体衝突

・白亜紀末の天体衝突

白亜紀末には，直径（10km / 180km）程度の小天体が地球に衝突した。この衝突による飛散物が太陽放射を遮ったことや，陸上で大規模な森林火災が発生したことなどにより，大量絶滅が引き起こされた。

・天体衝突の証拠

この時代の世界各地の地層には，イリジウムの濃集した粘土層がはさまれている。イリジウムは通常の地殻中にはほとんど含まれないため，イリジウムの濃集は地球外からの供給によるものだと考えられる。

メキシコのユカタン半島の地下には，このときの天体衝突によって形成されたクレーターの痕跡が残されている。

まとめ

- 海洋無酸素事変は，__________が広い海域で形成されたできごとである。
- この堆積岩は________に富み，層状であることから，無酸素または貧酸素の環境で形成されたと考えられる。
- 白亜紀末には，小天体が地球に衝突して大量絶滅を引き起こした。
- 小天体の衝突の証拠の一つは，この時代の世界各地の地層から発見される______________の濃集した粘土層である。

Chapter2　演習問題

ここでは，黒色頁岩の特徴について確認しましょう。

問題(1)　黒色頁岩の有機物について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

海洋では，光の十分に得られる表層で生物生産が活発である。海洋表層で生じたプランクトンの遺がいは，海水中をゆっくりと沈降する。このとき，海水中に酸素が十分に存在すれば，遺がいに含まれる有機物は（微生物 / 藻類 / 魚類）によって効率的に分解され，深海底にはほとんど供給されない。

黒色頁岩は，質量比で数％程度に達するような多くの有機物を含む岩石である。深海底でこのような岩石が形成されたのは，海洋表層では生物生産が（活発であり / ほぼ停止しており），その下部では酸素が（十分に存在した / ほとんど存在しなかった）ためだと考えることができる。

問題⑵ 堆積岩中の鉄について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

堆積岩中に見られる鉄のおもな形態として，酸化鉄（Ⅲ）Fe_2O_3 がある。Fe_2O_3 は堆積岩が（赤い / 黒い）色を示す原因となる。

堆積岩中に見られる鉄のもう 1 つの形態として，硫化鉄 FeS_2 がある。FeS_2 は堆積岩が（赤い / 黒い）色を示す原因となる。

ここで，Fe_2O_3 の Fe は酸化数が +3，FeS_2 の Fe は酸化数が +2 であり，Fe_2O_3 の Fe の方が酸化された状態にあるといえる。黒色頁岩には鉄が（Fe_2O_3 / FeS_2）として含まれており，黒色頁岩が（酸素に富んだ / 酸素に乏しい）環境で形成されたことを示している。

知っておこう

酸化数については化学基礎で学びます。ここでは，酸化数が大きいほど原子が酸化された状態にある，ということが理解できていれば十分です。

第 11 講 PART3 確認問題

問 1 次の文章を読み，下の問いに答えよ。

生物は進化の歴史の中で，何度も大きな環境変動に直面してきた。古生代末には大規模な a海洋無酸素事変，中生代末には b巨大隕石の衝突が起こり，これらのことは生物に大きな影響を与えたと考えられている。

(1) 下線部 a について，その証拠とされている岩石として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① 緑色の砂岩　② 緑色の泥岩

③ 黒色の砂岩　④ 黒色の泥岩

(2) 下線部 b の説明として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① メキシコのユカタン半島付近に直径約 10km の隕石が衝突した。

② メキシコのユカタン半島付近に直径約 100km の隕石が衝突した。

③ インド半島付近に直径約 10km の隕石が衝突した。

④ インド半島付近に直径約 100km の隕石が衝突した。

(3) 下線部 b について，ある元素の濃集した粘土層が世界各地の当時の地層から見つかったことが，その証拠とされている。ある元素として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① 鉄　② マンガン

③ イリジウム　④ ウラン

< Note >

PART4 新生代の環境変動

目標　南極氷床や東アジアモンスーンの成立過程について説明できる。

Chapter1　新生代の環境変動

新生代は，大陸配置や気候が現在に近づいてきた時代です。ここでは，その変化の過程について学びましょう。

中生代～新生代における大陸の移動

・パンゲアの分裂

中生代の三畳紀～ジュラ紀には，パンゲアが分裂して現在のユーラシア大陸を含むローラシアと，現在の南極大陸を含むゴンドワナに分かれた。

・ゴンドワナの分裂

ゴンドワナのうち，南極大陸からはジュラ紀にアフリカ，白亜紀にインドが分離した。新生代の古第三紀にはインドが北上してユーラシア大陸に衝突した。また，南アメリカやオーストラリアが南極大陸から分離して，南極大陸はほぼ現在の位置で孤立した。

南極氷床の成立

・南極環流の成立

南極大陸が孤立すると，南極のまわりを（東から西 / 西から東）へと周回する南極環流が成立した。

・南極氷床の形成

古第三紀の後半には，大気中の二酸化炭素濃度が現在の約2倍以下まで低下した。これにより温室効果が弱まったため寒冷化が進み，南極では大陸氷床の形成が始まった。

氷のアルベドは陸地よりも（大きい / 小さい）ため，氷床の形成により地表の吸収する太陽放射は（大きく / 小さく）なり，（温暖化 / 寒冷化）を引き起こす。これは大陸氷床の形成を促進するため，南極氷床は形成開始から数百万年で急速に発達したと考えられている。

知っておこう

少しの変化が起こるとその変化が自動的に強められるはたらきを正のフィードバックといいます。

インドの衝突と東アジアモンスーン

・ヒマラヤ山脈とチベット高原の形成

古第三紀にインドがユーラシア大陸に衝突すると，衝突山脈としてヒマラヤ山脈の形成が始まった。新第三紀までにはチベット高原も形成された。

・東アジアモンスーンの成立

現在の東アジアでは，夏季に（北風 / 南風），冬季に（北風 / 南風）が吹きやすい。このような，季節によって風向の変わる風を季節風〔モンスーン〕という。

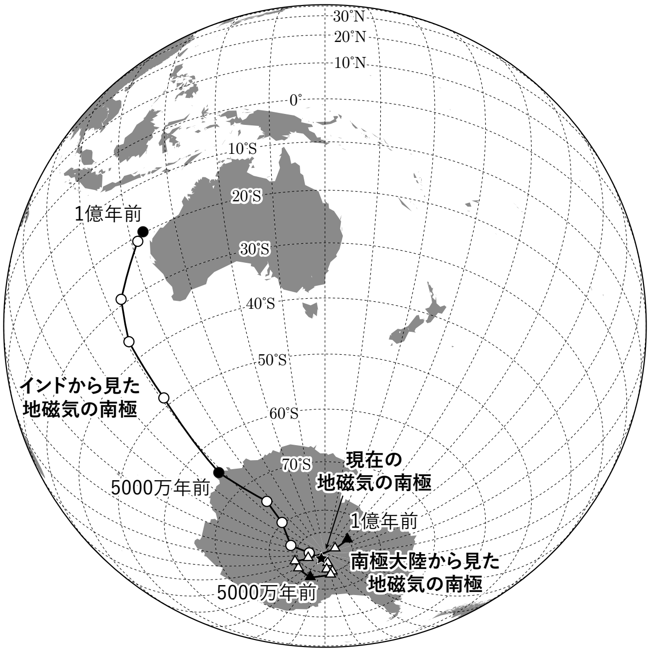
標高 4000m を超えるヒマラヤ山脈やチベット高原は，対流圏の下部から上部までの大気の流れに大きく影響している。東アジアモンスーンは，背の高いヒマラヤ山脈やチベット高原が形成されたことで成立したと考えられている。

まとめ

・南極氷床は，________紀に形成された。
・南極に氷床が形成されると太陽放射の吸収量が______するため，氷床の形成が促進された。これにより，南極氷床は急速に発達した。
・インドのユーラシア大陸への衝突は，________紀に起こった。
・この衝突によりヒマラヤ山脈や__________高原が形成され，東アジアモンスーンの成立につながった。

Chapter2　演習問題

　次の図は，過去 1 億年間の地磁気の南極の位置を，インドと南極大陸の岩石の残留磁気から復元したものです。ここでは，新生代における大陸移動について，この図を用いて確認しましょう。ただし，図中の○はインド，△は南極大陸から見た地磁気の南極の位置を 1000 万年間隔で示しています。



問題⑴　上の図について述べた下の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

　上の図によると，南極大陸から見た地磁気の南極の位置は，過去 1 億年間にわたってあまり変化していない。これは，この期間に南極大陸が現在とほぼ同じ位置にあったことを示している。

　それに対して，インドから見た地磁気の南極の位置は，1 億年前から現在にかけて(北 / 南)へと移動し続けている。これは，この期間にインドが（北 / 東 / 南 / 西）へと移動し続けていることを示している。

問題(2)　インドの移動について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

　前ページの図の○の間隔からは，1000万年あたりのインドの移動量を知ることができる。これによると，4000万年前から現在にかけての1000万年あたりの移動量は，それ以前とくらべて（大きい / 小さい）。これは，（古第三紀 / 新第三紀）にあたる約4000万年前にインドがユーラシア大陸に衝突したことによると考えられる。インドがユーラシア大陸に衝突したことで，その北側には（アンデス山脈 / アルプス山脈 / ヒマラヤ山脈 / ロッキー山脈）やチベット高原が形成された。

第11講　PART4　確認問題

問1　次の文章を読み，下の問いに答えよ。

地球の歴史上，大陸は合体と分裂を繰り返してきた。古生代の終わり頃にできた超大陸（　ア　）は，三畳紀～ジュラ紀に分裂し，現在のユーラシア大陸を含む（　イ　）と，アフリカ，南極，オーストラリアを含む（　ウ　）になった。（　ウ　）の一部であったインドは白亜紀に分離し，a 北上してユーラシア大陸に衝突した。また，南極もアフリカやオーストラリアから分離し，b 現在の位置で独立した大陸となった。

(1)　空欄ア～ウに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① ア：パンゲア　イ：ゴンドワナ　ウ：ローラシア
② ア：パンゲア　イ：ローラシア　ウ：ゴンドワナ
③ ア：ゴンドワナ　イ：パンゲア　ウ：ローラシア
④ ア：ゴンドワナ　イ：ローラシア　ウ：パンゲア

(2)　下線部aのできごとによって形成されたものとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① ウラル山脈　② タクラマカン砂漠
③ チベット高原　④ カスピ海

⑶　下線部ａのできごとによって形成されたものの影響で成立した東アジアモンスーンの特徴として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　夏：北風　　冬：南風

②　夏：南風　　冬：北風

③　夏：東風　　冬：西風

④　夏：西風　　冬：東風

⑷　下線部ｂに関連して，南極が急激に寒冷化した理由として間違っているものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　太陽放射の吸収量が小さくなった。

②　大気中の二酸化炭素濃度が低下した。

③　氷床が形成され，アルベドが大きくなった。

④　オゾンホールが形成され，紫外線量が増加した。

⑸　インドのユーラシア大陸への衝突と，南極での氷床の形成は同じころと考えられているが，その時代として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　白亜紀　　　　②　古第三紀

③　新第三紀　　　④　第四紀

PART5 ミランコビッチサイクル

目標　ミランコビッチサイクルを構成する３つの要素について説明できる。

Chapter1　ミランコビッチサイクル

第四紀は，氷期と間氷期のくり返しに特徴づけられる時代です。ここでは，そのくり返しがどのように生じているかについて学びましょう。

地球の軌道要素

・地球の公転

地球は太陽を（中心 ／ 1 つの焦点）とする楕円を描いて太陽の周りを公転している。

知っておこう
惑星の公転については，天文分野で詳しく扱います。

・地球の自転

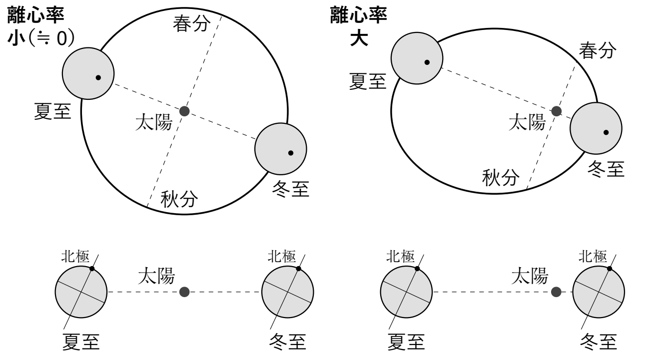
地球の自転軸は交点面と垂直な方向から約（23° ／ 67°）傾いている。

・地球の軌道要素

軌道長半径…………楕円軌道の半長軸の長さ
離心率………………楕円のつぶれ具合〔真円のとき 0〕
自転軸傾斜角………交点面と直交する方向と自転軸とのなす角
近日点を通る季節…公転軌道の長軸と自転軸の傾きの関係

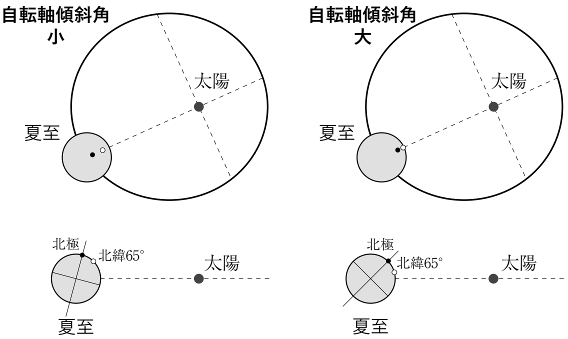
ミランコビッチサイクル

・離心率の変動



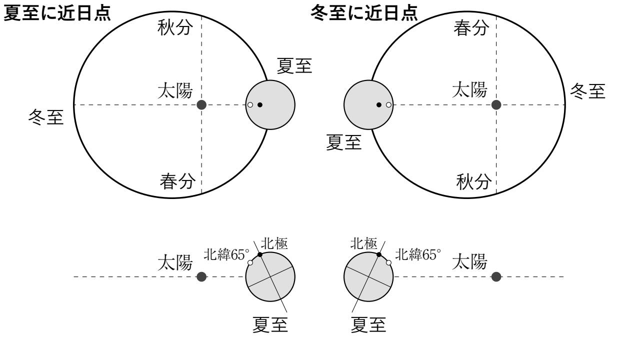
→離心率が大きいときの方が，地球全体が受ける日射量の季節変化や季節ごとの期間の長さの違いは（大きい / 小さい）。

・**自転軸傾斜角の変動**



→自転軸傾斜角が大きいときの方が，北半球高緯度が夏至の 1 日に受ける日射量は（大きい / 小さい）。

・**近日点を通る季節の変動〔歳差運動〕**



→冬至に近日点を通るときの方が，北半球高緯度が夏至の 1 日に受ける日射量は（大きい / 小さい）。

・**ミランコビッチサイクルと気候変動**

軌道要素の周期的な変動〔**ミランコビッチサイクル**〕によって，夏の北半球高緯度が受ける日射量も周期的に変化する。これが第四紀の氷期と間氷期のくり返しの原因となったと考えられている。

知っておこう

1920 年，セルビアのミランコビッチ (Milutin Milanković) は，地球の軌道要素の周期的な変動によって生じる，夏の北半球高緯度が受ける日射量の周期的な変動を計算によって求めました。また，その日射量が少なくなった時期と，過去の氷期の時期が対応していることを示しました。彼の研究は，天体物理学，気象学，古気候学を数値計算によって結び付けた先駆的で重要なものです。

まとめ

・地球の公転軌道の＿＿＿＿，自転軸傾斜角，近日点を通る季節の周期的な変動を＿＿＿＿＿＿＿＿サイクルという。

・これらの変動は，日射量の変動を通じて第四紀の氷期と間氷期のくり返しの原因となったと考えられている。

Chapter2　演習問題

　ここでは，第四紀の氷期と間氷期のくり返しについて，データを用いて確認しましょう。

問題⑴　海水の $^{18}O/^{16}O$ の変動について述べた下の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

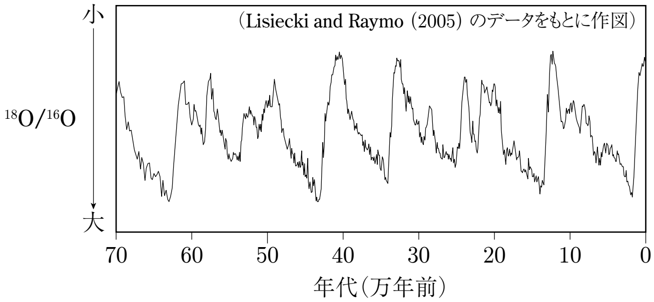
　水分子は水素原子と酸素原子からなる。酸素は主要な安定同位体として ^{16}O と ^{18}O をもち，酸素原子のうち約 99.8% は ^{16}O，約 0.2% は ^{18}O である。ここでは，海水中の ^{18}O の増減を示す指標として $^{18}O/^{16}O$ を用いる。これは，^{16}O に対して ^{18}O が何倍存在するかを表している。

　氷床の氷を構成する水は，海水が蒸発することによって大気へと供給された水がもとになっている。氷床の量が一定のとき，蒸発による海水の減少と，降水や河川の流入などによる海水の増加はつり合っている。このとき，海水の $^{18}O/^{16}O$ の値はほぼ一定である。

　ここで，氷床の量が増加していく時期について考えよう。水分子が氷として氷床に固定されていくので，蒸発による海水の減少量の方が，降水や河川の流入などによる海水の増加量よりも（多い / 少ない）といえる。

　ところで，^{16}O と ^{18}O を比較したとき，^{18}O の方が原子 1 個あたりの質量が大きい。そのため，^{16}O を含む水分子とくらべて ^{18}O を含む水分子の方が（蒸発しやすい / 蒸発しにくい）。したがって，氷床の量が増加していく時期には海水中の ^{18}O の割合は（大きく / 小さく）なっていき，海水の $^{18}O/^{16}O$ の値は（大きく / 小さく）なっていくと考えることができる。

問題⑵　次の図は，過去 70 万年間の海水の $^{18}O/^{16}O$ の変動を推定した例を示したものです。この図について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。



第四紀は氷床の存在する時代であり，気候変動によって氷床量も変動してきた時代である。**問題⑴**の議論をもとにしてこの図の縦軸を氷床の量と対応させると，図の上側が氷床の（多い / 少ない）環境を示しているといえる。この図からは，氷床量がゆっくりと（増加 / 減少）する時期と急激に（増加 / 減少）する時期が平均約（2 万年 / 10 万年）の周期でくり返されてきたようすが読み取れる。

問題⑶　氷床量の変動とミランコビッチサイクルについて述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

第四紀において，氷床量の変動が大きいのは北半球である。さらに，北半球の氷床の発達に対して大きな影響をもつのは，北緯 65°付近における（夏 / 冬）の日射量である。これは，氷床の南限付近で（夏に氷床があまり融けない / 冬に氷床が多く形成される）ことが氷床の発達に対して重要であることに対応している。この日射量は周期的に変動していることが知られており，その原因は地球の軌道要素の周期的な変動である。この周期的な変動をミランコビッチサイクルという。

第11講　PART5　確認問題

問１　次の文章を読み，下の問いに答えよ。

地球の気候は，太陽から受け取る熱に大きく影響を受け，周期的な変化をしている。セルビアの気象学者（　ア　）は，天体物理学や気象学，古気候学を使って数値計算を行い，a地球の軌道要素の周期的な変動により，b地球が受ける日射量の周期的な変化が生じていることを説明した。地球の軌道要素の周期的な変動を（　ア　）サイクルといい，これが（　イ　）の氷期と間氷期のくり返しの原因となったと考えられている。

(1)　空欄アに入る人物の名前として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　モホロビチッチ　　②　ベニオフ

③　ウィルソン　　④　ミランコビッチ

(2)　下線部ａについて，（　ア　）が計算したものとして間違っているものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　自転周期の変動

②　自転軸傾斜角の変動

③　近日点を通る季節の変動

④　離心率の変動

(3)　下線部ｂについて，地球の北半球高緯度地域が夏至の日に受ける日射量が大きくなるときとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　離心率が大きいとき

②　離心率が小さいとき

③　自転軸傾斜角が大きいとき

④　自転軸傾斜角が小さいとき

⑷　空欄イに入る語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　白亜紀　　②　古第三紀
③　新第三紀　　④　第四紀

テキスト解答

第１講　地震波と地球の内部構造

PART1　近地地震の走時曲線

問題(1)　ア：80 km　イ：64 km　ウ：4.5 s　エ：144 km

問題(2)　２倍，２倍，２倍，傾き，２倍，比例する

PART2　アイソスタシー

問題(1)　ア：Sd_1　イ：$\rho_1 Sd_1$　ウ：$\rho_3 Sh_1$

エ：$S(\rho_1 d_1 + \rho_3 h_1)$　オ：$S\{\rho_2 d_2 + \rho_3(h_1 + h_2)\}$

カ：$\rho_2 d_2 + \rho_3 h_2$

問題(2)　20 km，h_2 の方が大きい

PART3　遠地地震の走時曲線

問題(1)　ア：AH　イ：OA　ウ：$2R\sin\frac{\Delta}{2}$

問題(2)　0，21，37，43　【※図参照】

問題(3)　4000 km

問題(4)　大きすぎる，大きく

PART4　地球内部を構成する物質

問題(1)　ア：$\frac{4}{3}\pi R_0^3$　イ：$\frac{4}{3}\pi R_1^3$　ウ：$\left(\frac{R_1}{R_0}\right)^3$

エ：$\rho_0 V_0$　オ：$\rho_1 V_1$　カ：$\frac{\rho_1 V_1}{\rho_0 V_0}$　キ：$\frac{\rho_1}{\rho_0}\left(\frac{R_1}{R_0}\right)^3$

問題(2)　ク：0.33　ケ：84

第２講　重力

PART1　重力

問題(1)　ア：$R^3\omega^2$　イ：GM　ウ：0　エ：0

問題(2)　3.5×10^{-3}

PART2　ジオイドと地球楕円体

問題(1)　【※図参照】

問題(2)　【※図参照】

問題(3)　外側から２番目の円

PART3　重力補正

問題(1)　小さく，大きい，小さく，小さい，大きい，フリーエア補正

問題(2)　下向き，万有引力，小さく，ブーゲー補正

PART4　重力異常と地下構造

問題(1)　ほぼ成り立っている，山脈，小さい，小さい

問題(2)　逆断層，逆断層，背斜，向斜

第３講　熱

PART1　地殻熱流量

問題⑴　ア：480　イ：0.12　ウ：120　エ：0.030

問題⑵　1.6×10^4

PART2　地球内部の熱源

問題⑴　46，２倍，16倍，大きかった

問題⑵　減少，低下，減少，固体，低い，液体，高い，大きくなってきた

第 4 講　地磁気

PART1　地磁気の三要素

問題(1)　D：偏角　I：伏角　H：水平分力　F：全磁力　Z：鉛直分力

問題(2)　F：47000 nT　Z：36000 nT

問題(3)　I：60°　Z：44000 nT

問題(4)　2 つ，D

PART2　地磁気の分布

問題(1)　大きい，西，10°，東，5°，
真北をはさんで東西に広がっている，北より東側にある

問題(2)　大きい，45°，60°，0.7

PART3　地磁気の変化

問題(1)　第四紀，チバニアン

問題(2)　プラズマ，30 万 km，数百 km，約 8 分，数日，まだ発生していない

第５講　プレートテクトニクス

PART1　プレート境界と大地形

問題⑴　C，横ずれ断層，R，S，P

問題⑵　X：アンデス山脈　Y：ハワイ島　Z：大西洋中央海嶺

PART2　プレートテクトニクスの成立

問題⑴　作られたばかりの，海嶺，海嶺，2500 万年，太い，大きい

問題⑵　同じ，新しい海洋底が作られている，15km，15mm

PART3　プレートとマントルの動き

問題⑴　小さい，大きい，球面上を回転している

問題⑵　【図参照】

問題⑶　A，B，C

第６講　地震

PART1　震源の分布

問題(1)　大きく，小さい，太平洋側

問題(2)　弱まりやすく，弱まりにくい，小さく，大きい，浅い，深い

PART2　震源の決定

問題(1)　京丹後：100km

津　　：58 分 46.7 秒，58 分 56.0 秒，9.3 秒，78km

高野　：58 分 46.1 秒，58 分 54.3 秒，8.2 秒，69km

問題(2)　【図参照】

PART3　発震機構

問題(1)　【図参照】

問題(2)　引張，圧縮，右横ずれ，左横ずれ

問題(3)　震源断層は北北東―南南西方向にのびており，ずれ方は右横ずれであったと考えられる。

第７講　火山

PART1　造岩鉱物の性質

問題(1)　SiO_4^{4-}，２個，固溶体

問題(2)　２つ，２つまたは３つ，３つ，かんらん石，黒雲母

PART2　マグマの発生

問題(1)　120，50

問題(2)　冷たい，150，50,

PART3　マグマの性質の変化

問題(1)　ア：172　イ：60　ウ：35

問題(2)　エ：500　オ：35　カ：900　キ：465　ク：52

PART4　偏光顕微鏡による鉱物の観察

問題(1)　角閃石

問題(2)　多色性

問題(3)　斜長石

問題(4)　閃緑岩・花こう岩

第 8 講　造山運動

PART1　地殻変動の測定

問題(1)　GNSS

問題(2)　西北西，数十 cm，東南東，数十 cm，短縮

PART2　地殻変動と地形

問題(1)　海側，一定であり，形成されない，高くなり，形成される

問題(2)　10 万年，100 ～ 150m，低下，海側，上昇，陸側，低下，海側，上側

PART3　地殻変動と大陸地殻の形成

問題(1)　西部，新しい

問題(2)　原生代，新しく，北西から南東

PART4　付加体の形成と構造侵食

問題(1)　SiO_2，放散虫，チャート，タービダイト，

問題(2)　逆断層，逆断層，海側

PART5　変成作用と変成岩

問題(1)　高い，片麻岩，低い，片岩

問題(2)　火山弧の地下は周囲より高温，海溝付近の地下は周囲より低温となっているので，適当なものは X だと判断できる。

PART6　変成条件の推定

問題(1)　ア：Sz　イ：ρSz　ウ：ρSzg　エ：ρzg

問題(2)　オ：3×10^3　カ：20

問題(3)　大きい，小さい，400，藍晶石，1000，珪線石，
海溝付近，火山弧，低温高圧型，片岩，高温低圧型，片麻岩

第９講　地表の変化

PART1　風化作用

問題⑴　等粒状組織，低い，黒雲母，増加，増加

問題⑵　物理的風化，化学的風化，

PART2　さまざまな地形と堆積物

問題⑴　石英，北西，円みを帯びている，斜交層理

問題⑵　間氷期，カール，侵食作用，モレーン

第10講　地質調査と地質図

PART1　走向と傾斜

問題(1)　反時計回り

問題(2)　反時計回り，θ，c

PART2　ルートマップ

問題(1)　【※図参照】

問題(2)　水平面，南北，D 地点・E 地点

PART3　地質断面図と地質柱状図

問題(1)　【※図参照】

問題(2)　堆積構造，泥岩，砂岩，垂直，14m

PART4　地質図

問題(1)　【※図参照】

問題(2)　西側，東側，60m

第 11 講　地球の歴史

PART1　造岩鉱物の性質

問題(1)　^{14}C，変化せず，減少する，12000 年

問題(2)　黒雲母やカリ長石，数十万年以上

PART2　全球凍結

問題(1)　約 23 ～ 22 億年前，約 7 ～ 6 億年前，角ばった

問題(2)　シアノバクテリア，オゾン層

PART3　顕生代の特徴的な環境変動

問題(1)　微生物，活発であり，ほとんど存在しなかった

問題(2)　赤い，黒い，FeS_2，酸素に乏しい

PART4　新生代の環境変動

問題(1)　南，北

問題(2)　小さい，古第三紀，ヒマラヤ山脈

PART5　ミランコビッチサイクル

問題(1)　多い，蒸発しにくい，大きく，大きく

問題(2)　少ない，増加，減少，10 万年

問題(3)　夏，夏に氷床があまり融けない

確認問題解答

第1講　PART1　確認問題　解答

問1

(1)　②

解説：
走時とは，地震が発生してから，地震波が観測点に到達するまでに要した時間のことである。

(2)　②

解説：
走時曲線は，縦軸が時間（走時），横軸が距離（震央距離）なので，傾きは速度の逆数を表している。

(3)　①

解説：
折れ曲がる前のグラフは震央に近いところなので，地殻だけを伝わってきた直接波，折れ曲がった後のグラフは地殻とマントルを伝わってきた屈折波である。

(4)　④

解説：
ブーゲー，フリーエアは重力異常，ジオイドは地球の形状に関する名前である。

(5)　②

解説：
モホロビチッチ不連続面は地殻とマントルの境界面である。

⑹　②

解説：
モホロビチッチ不連続面が深くなると，折れ曲がりが生じる震央距離は大きくなる。

第1講　PART2　確認問題　解答

問 1

(1)　④

解説：

上部マントルは主にかんらん岩からできている。

(2)　②

解説：

地殻は流動性のあるマントルに浮いている状態といえ，地殻にはたらく重力と浮力がつり合うことにより，地殻は静止した状態に保たれている。この状態を，アイソスタシーという。

(3)　①

解説：

浮力の大きさは押しのけた物質の重さに等しいので，マントル内の同じ深さでは，単位面積にかかる重さが等しくなる。

(4)　②

解説：

単位面積の上にある物質の質量が等しいことから，密度と厚さの積の総和も等しい。

よって，地殻 A の厚さを x とおくと，

$$2.7\text{g/cm}^3 \times x = 2.7\text{g/cm}^3 \times 10\text{km} + 3.3\text{g/cm}^3 \times (x - 4\text{km} - 10\text{km})$$

より，$x = 32$ km

第1講　PART3　確認問題　解答

問 1

(1)　④

解説：
S 波は液体中を伝わらないため，約 103° 以遠のところには伝わらないが，P 波はマントルと核の境界で屈折するだけなので，再び約 143° 以遠のところにあらわれる。

(2)　①

解説：
縦波（疎密波）は波の進行方向と振動方向が平行で，液体中でも伝わる。一方，横波（剪断波）は波の進行方向と振動方向が垂直で，液体中は伝わらない。

(3)　①

解説：
S 波が約 103° 以遠のところに伝わらないため，液体の層があることが推定される。

第 1 講　PART4　確認問題　解答

問 1

(1)　①

解説：
太陽大気やある種の隕石の元素組成は，太陽系のもとになった物質の元素組成をよく保存していると考えられている。

(2)　①

解説：
C はただ一つの元素が 90% 近くを占めているので核，A は 2 番目に多い元素が Mg なのでマントルとなる。

(3)　①

解説：
地球全体で最も多い元素が Fe, 次が O となる。また B（地殻）で 2 番目に多いものが Si，3 番目に多いものが Al となる。

第 2 講　PART1　確認問題　解答

問 1

(1)　③

解説：
すべての物体の間には，互いに引き付け合う力がはたらいている。この力を万有引力という。地球による万有引力は，地球の重心に向かってはたらく。

(2)　②

解説：
回転運動している物体には，回転の中心から離れる向きに力がはたらいていると考えることができる。この力を遠心力という。

(3)　②

解説：
2 つの物体の間にはたらく万有引力の大きさは 2 つの物体の質量の積に比例し，2 つの物体の重心間距離の 2 乗に反比例する。遠心力の大きさは回転半径に比例する。

(4)　①

解説：
実際に，重力加速度は赤道で最小，極で最大となっている。

第 2 講　PART2　確認問題　解答

問 1

(1)　①

解説：
平均海水面は，すべての場所で重力と垂直な，なめらかな曲面である。

(2)　③

解説：
地球の表面の約 70%は海洋である。

(3)　④

解説：
ジオイドは，なめらかな曲面だが回転楕円体ではなく，起伏をもっている。ジオイドと最もよく合う回転楕円体を考え，それを地球楕円体という。

(4)　②

解説：
地球楕円体を基準面として，そこからジオイドまでの高さをジオイド高といい，－ 100m ～ 100m 程度の範囲の値をとる。

第 2 講　PART3　確認問題　解答

問 1

(1)　③

解説：
実際の地球では密度分布が場所によって異なるので，密度分布が均質であると仮定して計算した重力の大きさを標準重力という。

(2)　②

解説：
重力の実際の測定値は標準重力とは必ずしも一致しない。重力の測定値から標準重力を引いた値を重力異常という。

問 2

(1)　③

解説：
標準重力はジオイドより上に物質がないと仮定しているので，ジオイドと測定点との間にある岩石を取り去る補正を行う必要がある。

(2)　②

解説：
標準重力は，地表が水平であることを仮定して算出されているため，測定点の周囲に山があればそれを削り，谷があればそれを埋めるような補正を行う必要がある。

(3)　①

解説：
測定点はふつうジオイドよりも上にあるため，標高を 0 m まで下げる補正を行う必要がある。

第 2 講　PART4　確認問題　解答

問 1

(1)　②

解説：
重心間距離を補正したときの重力異常がフリーエア異常である。

(2)　②

解説：
プレートの沈み込む境界である海溝付近では，下向きの力により地表面が押し下げられる。

(3)　①

解説：
アイソスタシーが成り立っていれば，地表面より下にある物質の質量は場所によらず等しいので，フリーエア異常はほぼ 0 になる。

問 2

(1)　③

解説：
ブーゲー異常は，重力の実測値にフリーエア補正，地形補正，ブーゲー補正を行った重力値から標準重力を引いた値である。

(2)　①

解説：

ブーゲー補正では，物質の密度は一定だと仮定し , 重力値からジオイドと測定点との間にある物質による万有引力を引き去る。

問 3　②

解説：

金属の密度は岩石よりも大きいので，金属鉱床が地下にあれば，ブーゲー異常は大きい。

第 3 講　PART1　確認問題　解答

問 1

(1)　①

解説：
地殻熱流量の平均値は 0.08 ～ 0.09W/m^2 である。

(2)　③

解説：
地殻熱流量は，地下増温率に比例し，その比例定数を熱伝導率という。日本列島において，火山前線から日本海側にかけては，多くの火山が分布するため，地殻熱流量は大きい。

(3)　①

解説：
地殻熱流量は，大陸地域より海洋地域の方が大きく，海洋地域では，冷えたプレートが沈み込む海溝よりマントル物質が上昇している海嶺の方が大きい。

第3講　PART2　確認問題　解答

問1　①

解説：
熱は，地殻ではおもに伝導により伝わり，マントルや外核ではおもに対流により伝わる。

問2　④

解説：
地球中心部の温度は約 5000℃に達すると考えられている。

問3　②

解説：
地球は，微惑星の集積によって形成され，大部分が融けるほどの高温になった。このとき核やマントルにたくわえられた熱は，地球の歴史を通して少しずつ放出されている。
また，岩石中には放射性同位体が含まれており，崩壊にともなって熱を放出する。大陸地殻上部を構成する花こう岩は，海洋地殻を構成する玄武岩よりも SiO_2 の割合が大きく，放射性同位体を多く含むので，大陸地殻の方が発熱量が大きい。

第 4 講　PART1　確認問題　解答

問 1

⑴　④

解説：
偏角の偏はかたよるという意味で，南北線からのかたよりを，伏角の伏はもぐるという意味で，水平面からのもぐりを表す。

⑵　①

解説：
地磁気の向きの基準は水平面上の南北線であり，そこから水平面上でどれだけずれているのかを表す角が偏角である。また，鉛直面上で地磁気が水平面となす角度が伏角である。地磁気の大きさは全磁力と，その水平方向，鉛直方向の分力を用いる。

⑶　④

解説：
３次元空間内で向きと大きさを特定するためには，いくつかの組合せが可能であるが，偏角だけは他の要素の組合せで表すことができないので，必ず含める必要がある。

第 4 講　PART2　確認問題　解答

問 1

（1）④

解説：
方位磁針の N 極が北を指すことから，棒磁石の北側が S 極となる。また，自転軸に対して約 10°傾いている。

（2）③

解説：
地磁気極では，理論上伏角が ± 90° になるが，実際には地磁気は地球の内部に棒磁石を置いたときの磁場とは一致していないため，精密に測定すると伏角が ± 90° になる点と地磁気極はずれが生じる。

（3）②

解説：
実際に伏角が ± 90° になる点を磁極（磁北極，磁南極）という。

（4）④

解説：
北極に近いところにある磁極（S 極）で伏角が 90°，赤道付近で 0° に近いことを考えると，北緯 35° 付近の本州では方位磁針の N 極は水平面より下を指し，伏角は 50° ほどになる。

第 4 講　PART3　確認問題　解答

問 1

(1)　①

解説：
地磁気は，外核にある液体の鉄が流動することにより安定的に存在しているとする考え方をダイナモ理論という。

(2)　③

解説：
マグマが冷え固まるときに火成岩に記録される磁気を熱残留磁気，砕屑物が堆積するときに堆積岩に記録される磁気を堆積残留磁気という。

問 2

(1)　④

解説：
太陽風はコロナから流れ出してくるもので，主に陽子や電子といった荷電粒子（プラズマ）の流れである。

(2)　①

解説：
太陽風と地球磁気圏の境界を磁気圏境界面といい，この外側に衝撃波面，地球磁気圏の夜側にはプラズマの層（プラズマシート）が形成される。

(3)　③

解説：
太陽フレアにともなって，地磁気が急激に変化する磁気嵐が発生することがある。

⑷　④

解説：

地磁気の短周期変化には, 1 日, 1 か月, 1 年, 11 年といったものがあり，それぞれ地球の自転，太陽の自転，地球の公転，太陽活動が原因となっている。

第5講　PART1　確認問題　解答

問1

(1)　④

解説：

プレートは比較的かたい部分で，リソスフェアという。

(2)　③

解説：

リソスフェアの下にある比較的やわらかい部分をアセノスフェアという。

(3)　②

解説：

地震波速度は，やわらかい層ほど小さくなる。

問2

(1)　②

解説：

プレートどうしが離れる境界を発散境界，近づく境界を収束境界，すれ違う境界をすれ違い境界という。

(2)　①

解説：

大陸プレートどうしが衝突すると，ヒマラヤ山脈のような大山脈が形成される。

(3)　②

解説：

背弧に縁海をともなう日本列島は島弧の例，背弧に縁海をともなわないアンデス山脈は陸弧の例である。

第 5 講　PART2　確認問題　解答

問 1

(1)　③

解説：
超大陸パンゲアはジュラ紀半ばに 2 つに分裂し，ゴンドワナ大陸とローラシア大陸になった。

(2)　②

解説：
パンゲアは中生代まで存在したとされる大陸なので，分裂までに存在した氷河や地質構造，岩石，生物の分布がつながることが証拠となる。

(3)　④

解説：
①～③は，その後に提唱された海洋底拡大説に関連する現象である。

問 2

(1)　③

解説：
海嶺では，上昇してきたマントル物質から新しい海洋底が形成されていると考えられた。

(2)　①

解説：
残留磁気が，現在の地磁気と同じ向きの部分と，逆向きの部分が交互に分布するので，縞模様と表現される。

第5講　PART3　確認問題　解答

問1

(1)　④

解説：
マントルの動きには，上昇流と下降流が見つかっており，全体として対流運動をしていると考えられている。

(2)　①

解説：
回転の角速度が一定のとき，回転の半径が大きいほど移動速度は大きくなる。

問2

(1)　③

解説：
地震波トモグラフィーにより地下の地震波速度の分布を調べる。地震波速度が大きいところは岩石がかたく低温で，地震波速度が小さいところは岩石がやわらかく高温である。

(2)　④

解説：
大規模な上昇流があると推定されているのは南太平洋と，東アフリカである。

(3)　①

解説：
マントルの大規模な上昇流のことをプルームという。

第6講　PART1　確認問題　解答

問1

（1）②

解説：
マグニチュードの大きな地震はプレートの沈み込み境界で発生することが多い。また，マグニチュードの小さな地震ほど多く発生している。

（2）③

解説：
震源の深さが100km を超える地震を，深発地震という。

（3）③

解説：
震源の並ぶ面を，深発地震面または和達－ベニオフ帯という。

第6講　PART2　確認問題　解答

問1

(1)　③

解説：
P波が到達してからS波が到達するまでの時間のことを初期微動継続時間という。

(2)　①

解説：
$d = kt$ である。この関係式を震源距離に関する大森公式といい，初期微動継続時間がわかれば，震源距離を求めることができる。

問2　①

解説：
3地点における震源距離から，震源の位置を決定することができる。

第 6 講　PART3　確認問題　解答

問 1　③

解説：
P 波は縦波であるから，振動の方向は進行方向に平行である。地震計の上下動の記録から，P 波初動の押し引きの向きがわかる。

問 2　①

解説：
P 波初動の押し引き分布は，震央で直交する 2 直線によって「押し」と「引き」の領域に分けられる。

第7講　PART1　確認問題　解答

問 1

(1)　①

解説：

Mg や Fe を多く含み，黒っぽく見える鉱物を有色鉱物という。Mg や Fe を含まず，白っぽく見える鉱物を無色鉱物という。

(2)　④

解説：

有色鉱物は，その骨格における SiO_4 四面体どうしの結びつき方でさらに細かく分類される。

(3)　④

解説：

結晶構造が同じで，化学組成が連続的に変化する鉱物を固溶体という。

(4)　②

解説：

石英以外の主要造岩鉱物は固溶体をもつ。

第7講　PART2　確認問題　解答

問1　②

解説：
岩石の一部が融けることを部分溶融という。マントルのかんらん岩が部分溶融すると，SiO_2 の割合がやや高い玄武岩質のマグマができる。

問2　①

解説：
多くの鉱物について，圧力が高いほど融点は高いので，岩石の融け始める温度は，地下深くなるほど高い。

問3　④

解説：
部分溶融のおもな原因は，プレートの発散境界では減圧，沈み込み境界では減圧と水の供給である。

第7講　PART3　確認問題　解答

問1

（1）④

解説：
有色鉱物は，かんらん石→輝石→角閃石→黒雲母の順番で結晶化していく。

（2）①

解説：
有色鉱物が結晶化するにともない，マグマから Mg や Fe が取り除かれていく。

（3）②

解説：
マグマから結晶化した鉱物が取り除かれることによって，いろいろな化学組成のマグマが形成される作用を，マグマの結晶分化作用という。

第7講　PART4　確認問題　解答

問1

(1)　②

解説：
自然界で形成された結晶を鉱物という。

(2)　④

解説：
結晶が一定の面に沿って割れる性質を劈開という。

(3)　③

解説：
黒雲母は平行な 1 方向で割れる。角閃石は約 120°で交わる 2 方向，輝石は約 90°で交わる 2 方向で割れる。

問2

(1)　①

解説：
開放ニコルで観察したとき，ステージを回転させると色が変化するものがある。この色の変化を多色性という。なお，劈開は鉱物の割れ目なので，直交ニコルでも見られる。

(2)　④

解説：
多色性は，かんらん石以外の有色鉱物で見られる。

(3)　①

解説：
干渉色は，光学的異方性をもつ鉱物を観察したときに見られる。ケイ酸塩鉱物のうち無色鉱物の干渉色は灰色であり，有色鉱物の干渉色は灰色のものもあるが，鮮やかな色となるものもある。

第 8 講　PART1　確認問題　解答

問 1

(1)　①

解説：
Global Navigation Satellite System の略である。全球的に利用できる代表的な GNSS としては，米国の GPS が挙げられる。

(2)　④

解説：
Very Long Baseline Interferometry の略である。

(3)　②

解説：
三角測量によって水平方向の位置を，水準測量によって標高を決定することができる。

第 8 講　PART2　確認問題　解答

問 1

（1）　②

解説：
断層運動により生じる土地の高低差が地形を形成する。河岸段丘は全体として海水準が低下することで形成される。

（2）　①

解説：
ヒマラヤ山脈は，ユーラシア大陸とインド大陸が衝突し，その間の部分が激しく圧縮され，褶曲することにより形成された。

問 2

（1）　④

解説：
氷期は寒冷化し，海水が大陸上の氷河などになることにより海水準が低下する。間氷期は温暖化して，海水が増加することにより海水準が上昇する。

（2）　②

解説：
段丘は隆起（海水準低下）による地形，リアス海岸は沈降（海水準上昇）による地形である。

⑶　④

解説：

海食崖は波に侵食されてできるものであり，海食崖がさらに侵食され，後退することによって海食台が形成される。海水準の低下や地盤の隆起によって海食台が海面より高くなると，海岸段丘が形成される。

第 8 講　PART3　確認問題　解答

問 1

（1）②

解説：
変成帯は造山運動によって広域変成岩がつくられ，分布しているところである。

（2）①

解説：
超大陸は主要な大陸塊の多くが 1 つに合体してできるものである。

（3）①

解説：
安定地塊は大陸どうしが衝突・合体しながら成長していく。その衝突している場所がこの地帯になるので，外側に移っていくことになる。

問 2

（1）①

解説：
プレートの沈み込み帯に沿って存在する火山前線の直下でこのような作用がはたらき大陸地殻は成長する。

（2）③

解説：
大陸地殻は，上部は流紋岩質マグマが冷え固まった花こう岩，下部は玄武岩質マグマが冷え固まった斑れい岩，上部マントルはかんらん岩でできている。

第 8 講　PART4　確認問題　解答

問 1

⑴　④

解説：
海のプレート上の岩石や地層がはぎとられ，陸のプレートに付加したものを付加体という。

⑵　②

解説：
まず海嶺で玄武岩が噴出し，その上に遠洋性のチャートなど細粒のケイ質堆積物，さらにその上に陸域由来の砂岩や礫岩のような陸源性砕屑物が重なる。

⑶　②

解説：
陸のプレートと海のプレートがぶつかり，押し合う力がはたらくことにより形成されるので逆断層ができる。

問 2

⑴　③

解説：
海の堆積物は陸のプレートの底に付加されながら，プレート境界である海溝は，海のプレートが移動してくる上流方向に移動していく。

⑵　①

解説：
海のプレートが沈み込むときに，付加体には断層が形成され，その作用によって付加体は削り取られていく。これを構造侵食という。

第 8 講　PART5　確認問題　解答

問 1

(1)　②

解説：
広域変成作用は海溝に沿って幅数十 km，長さ数百 km におよぶ。接触変成作用はマグマに接する厚さ数 m から数 km の範囲で起こる。

(2)　④

解説：
低温高圧型の変成作用は，冷たいプレートが地下深部へと沈み込むことが原因なので海溝付近で起こる。高圧の影響で鉱物が一方向に並び，板状に割れやすい片岩が代表的である。

(3)　①

解説：
高温低圧型の変成作用は，火山弧の地下におけるマグマの上昇が原因で起こる。有色鉱物と無色鉱物からなる縞模様が発達している片麻岩が代表的である。

(4)　③

解説：
砕屑岩が接触変成作用を受けると緻密でかたいホルンフェルスとなる。

第 8 講　PART6　確認問題　解答

問 1

(1)　④

解説：
化学組成が同じで結晶構造が異なる鉱物の関係を多形という。

(2)　②

解説：
ダイヤモンドと多形の関係にあるものは，化学組成が同じ C の石墨である。

問 2

(1)　①

解説：
図中の 600℃，2×10^8 Pa の点が珪線石の領域（右上）へ移動するので，温度も圧力も上昇させる必要がある。

(2)　③

解説：
ダイヤモンドと形成領域が重なるのは藍晶石だけである。

第 9 講　PART1　確認問題　解答

問 1

(1)　①

解説：
マグマから火成作用によって火成岩ができ，火成岩から変成作用によって変成岩ができる。堆積岩からも変成作用によって変成岩ができる。

(2)　③

解説：
堆積物が固結して堆積岩になる作用を続成作用という。

問 2

(1)　④

解説：
砕かれるものは物理的な破壊であり，溶かされるものは化学的な成分による溶解である。カルスト地形は石灰岩の炭酸カルシウムが溶解することによって形成される。

(2)　②

解説：
物理的風化は寒暖差が大きいところで起こりやすく，化学的風化は温暖湿潤なところで起こりやすい。

(3)　④

解説：
風化残留鉱床の形成は，化学的風化の例である。

第9講　PART2　確認問題　解答

問1

(1)　③

解説：
風の侵食・運搬作用は流水に比べて弱い。砂丘は乾燥地域の砕屑物が風に運ばれ，再び堆積して形成される。

(2)　②

解説：
砂丘の砕屑物は，何度も侵食・運搬・堆積をくり返すことで，粒径は揃い，形は丸みを帯びている。

問2

(1)　④

解説：
万年雪が自らの重みで氷となって流動しているのが氷河である。

(2)　②

解説：
カールは，氷河による侵食・運搬作用により，山の斜面がスプーンで削られたような地形である。

(3)　③

解説：
モレーンを形成する礫は，氷河が流れるときに削り取ったもので，粒径は不揃いで，形は角ばっている。

第 10 講　PART1　確認問題　解答

問 1

（1）②

解説：
走向とは，地層や断層の面（地層面）と水平面との交線（走向線）の方向のことである。また，傾斜の大きさは，地層面の最大傾斜の方向が水平面となす角の大きさのことである。

（2）①

解説：
走向線が北（N）から東（E）と西（W）のどちらに何度ずれているかを記す。

（3）③

解説：
地層面の最大傾斜の方向は，走向線と直交する断面に見える地層面の向きである。傾斜の向きは，この最大傾斜の方向を 8 方位で表す。南西方向は SW と表す。

問 2

（1）①

解説：
クリノメーターは薄い直方体に磁針，垂針（おもり），水準器などのついた構造が基本となっている。

第10講 PART2 確認問題 解答

問1

(1) ④

解説：
長い線分が走向の方向を表し，短い線分が傾斜の向きを表す。

(2) ②

解説：
ルートマップをもとに断面図や柱状図を描き，調査場所の地質構造を推定する。

第 10 講　PART3　確認問題　解答

問 1

(1)　③

解説：
地層の傾きは，切断面の向きによって異なって見えるので，地層の傾斜を正しく読み取るには，走向に垂直な向きの断面図を描く必要がある。

(2)　④

解説：
柱状図は，地層面と垂直な向きの地層の積み重なり方を表し，地層の特徴や厚さを正しく表す。

(3)　③

解説：
地層の対比は，離れた地域の柱状図に含まれるかぎ層を用いて行われる。

第10講　PART4　確認問題　解答

問1

(1)　③

解説：
柱状図は地層面と垂直な向きの地層の積み重なり方を表す。

(2)　④

解説：
地質図は上から見たときの地層の広がりを表す。

(3)　①

解説：
ルートマップは限られた地点で上から見たときの地層の見え方を表す。

(4)　②

解説：
断面図は横から見たときの地層の広がりを表す。

問2

(1)　③

解説：
地層面とある標高の水平面の交線が走向線であるから，地層境界線とある標高の地形等高線の交点を結んだ直線は走向線となる。

⑵　①

解説：

走向線の向きが走向を表す。2 本の走向線の水平間隔と標高差から地層の傾斜がわかる。

第 11 講　PART1　確認問題　解答

問 1

(1)　①

解説：
原子核が放射線を放つ性質を放射能という。放射能をもつ同位体を放射性同位体という。

(2)　②

解説：
^{14}C の半減期は 6000 年である。

問 2

(1)　③

解説：
放射性同位体は崩壊により安定同位体になる。

(2)　④

解説：
放射性同位体の ^{238}U は崩壊により最終的に安定同位体の ^{206}Pb になる。

第 11 講　PART2　確認問題　解答

問 1

(1)　②

解説：
地球全体の熱収支を考えると，地球の表面は，太陽放射と地球放射がつり合う温度に保たれている。

(2)　①

解説：
氷は大陸や海洋よりも色が白っぽく，太陽放射を反射しやすい。そのため，氷に覆われた両極の方がアルベドが大きい。

(3)　①

解説：
全球凍結は，原生代の初期（23 ～ 22 億年前）と後期（7 ～ 6 億年前）の 2 回あったと考えられている。

(4)　④

解説：
地球全体が氷で覆われた状態のことを全球凍結（スノーボールアース）という。

第 11 講　PART3　確認問題　解答

問 1

(1)　④

解説：
有機物に富んだ層状の黒い泥岩が広い海域で形成されたことである。酸素欠乏状態で有機物が分解されず，海底の生物に乱されることなく層状に堆積したと考えられる。

(2)　①

解説：
メキシコのユカタン半島の地下に，巨大隕石衝突によって形成されたクレーターの痕跡が残っている。

(3)　③

解説：
イリジウムは通常の地殻中にはほとんど含まれていないので，濃集したイリジウムは地球外が起源と考えられる。

第 11 講　PART4　確認問題　解答

問 1

（1）②

解説：
超大陸パンゲアが，北のローラシアと南のゴンドワナに分裂した。

（2）③

解説：
インドがユーラシア大陸に衝突することにより，ヒマラヤ山脈とその北側のチベット高原が形成された。

（3）②

解説：
東アジアでは，夏に南風，冬に北風が吹きやすい。このような，季節によって風向を変化させる風をモンスーン（季節風）という。東アジアモンスーンは，ヒマラヤ山脈，チベット高原という標高の高い地形が形成された影響で大気の流れが変化して成立した。

（4）④

解説：
二酸化炭素濃度が低下し，温室効果が弱まったことをきっかけに寒冷化し，氷床が発達し，その結果アルベドが大きくなり，太陽放射の吸収量が下がった。このように正のフィードバックがはたらき，寒冷化が促進された。

⑸　②

解説：

インドは白亜紀に南極大陸から分離し，古第三紀にユーラシア大陸に衝突した。南極は古第三紀に独立して急激に寒冷化し，氷床を発達させた。

第 11 講　PART5　確認問題　解答

問 1

(1)　④

解説：
このような結果を導き出したのはセルビアの気象学者ミランコビッチである。

(2)　①

解説：
離心率の周期的な変動，自転軸傾斜角の周期的な変動，近日点を通る季節の周期的な変動（歳差運動）をミランコビッチサイクルという。

(3)　③

解説：
自転軸傾斜角が大きいとき，北半球高緯度地域は太陽の方を向くので，受ける日射量は大きくなる。

(4)　④

解説：
第四紀は氷期と間氷期がくり返されている。

はじめに

高等学校の「地学」は，とても幅広い内容を扱う科目です。固体地球，地質，大気・海洋，惑星，天文と大まかな分野を並べただけでも，よくわかりますね。

みなさんが既に学んだ「地学基礎」は，さまざまな事実について広く知識を得て，それらと人間生活との関係について考える科目でした。「地学」では，観測事実や理論について知ることだけでなく，それらの物理学的・化学的な背景や，研究史を学ぶことも重視されます。内容の幅広さに対応して，必要となる基礎知識も多いといえます。

この「ベーシックレベル地学」は，そんな「地学」を学ぶ最初の一歩として作られた講座です。具体的には，次のような特徴があります。

- 全範囲を扱うが，細分化されているため 1 パートあたりの内容は少ない
- 紹介する単語は特に重要なものに絞られているため，数が少ない
- 演習で具体的な事例や計算例が多く扱われ，内容がイメージしやすい
- 地学に関連する他科目のまとめがある（第 22 講）

できるだけ無理なく学習を進められるようなつくりになっていますので，ゆっくり進めていきましょう。

なお，「地学」の学習は，次のような 3 ステップで進めていくことが大切です。

1. 各単元の理論や時間の流れなど，大まかな背景を理解する
2. （1. にでてきた）重要な単語を覚える
3. 1. を深めるための問題演習や，2. に含まれなかった単語の学習を進める

これらのうち，「ベーシックレベル地学」はおもに 1 と 2 に対応しています。本講座で基礎をしっかりと作り，次のステップにつなげていきましょう。

野津　太一

講座の受け方

受講対象

おもに「地学」を初めて学ぶ人

ただし，「地学基礎」を既に学んだ人

講座の構成

各 PART は「講義」「演習問題」「確認テスト」で構成されています。

- **講義**　基本的な知識や重要事項を学習します。短い動画があります。
- **演習問題**　講義の内容に関連した演習を行います。短い動画があります。
- **確認テスト**　授業で学んだ内容を復習するための問題です。

学習の流れ

- **「講義」前の予習**　基本的に不要です。
- **授業（「講義」）**　「講義」の動画で学びましょう。
- **「演習問題」前の予習**　できる範囲で，演習問題に取り組んでみましょう。
- **授業（「演習問題」）**　「演習問題」の動画で学びましょう。
- **復習**　授業で学んだ内容を，確認テストで復習しましょう。

「講義」の学び方

テキスト本文の一部が選択形式，まとめの一部が穴埋め形式になっています。授業を受けながら書き込んでいき，復習の際にはそこを中心に確認していくとよいでしょう。

「演習問題」の学び方

「講義」の内容に沿った知識の確認の問題もありますが，図やグラフの読み取りを行う問題のほか，計算や作図を行う問題も収録しました。少し時間のかかるものもありますので，理解を深めるために，自分で取り組んでみるとよいでしょう。

「確認テスト」の学び方

「確認テスト」は基本的な重要事項を確認するための問題です。できなかったところは，「講義」や「演習問題」の復習をしてから再挑戦しましょう。

< Note >

目次

前編

第1講 地震波と地球の内部構造
- PART1 近地地震の走時曲線
- PART2 アイソスタシー
- PART3 遠地地震の走時曲線
- PART4 地球内部を構成する物質

第2講 重力
- PART1 重力
- PART2 ジオイドと地球楕円体
- PART3 重力補正
- PART4 重力異常と地下構造

第3講 熱
- PART1 地殻熱流量
- PART2 地球内部の熱源

第4講 地磁気
- PART1 地磁気の三要素
- PART2 地磁気の分布
- PART3 地磁気の変化

第5講 プレートテクトニクス
- PART1 プレート境界と大地形
- PART2 プレートテクトニクスの成立
- PART3 プレートとマントルの動き

第6講 地震
- PART1 震源の分布
- PART2 震源の決定
- PART3 発震機構

第7講 火山
- PART1 造岩鉱物の性質
- PART2 マグマの発生
- PART3 マグマの性質の変化
- PART4 偏光顕微鏡による鉱物の観察

第8講 造山運動
- PART1 地殻変動の測定
- PART2 地殻変動と地形
- PART3 地殻変動と大陸地殻の形成
- PART4 付加体の形成と構造侵食
- PART5 変成作用と変成岩
- PART6 変成条件の推定

第9講 地表の変化
- PART1 風化作用
- PART2 さまざまな地形と堆積物

第10講 地質調査と地質図
- PART1 走向と傾斜
- PART2 ルートマップ
- PART3 地質断面図と地質柱状図
- PART4 地質図

第11講 地球の歴史
- PART1 放射性年代
- PART2 全球凍結
- PART3 顕生代の特徴的な環境変動
- PART4 新生代の環境変動
- PART5 ミランコビッチサイクル

後編

第12講 地球表層の熱収支
PART1 シュテファン・ボルツマンの法則
PART2 ウィーンの変位則
PART3 地球の全球熱収支と温室効果
PART4 地球の放射平衡温度

第13講 大気の構造
PART1 大気の組成
PART2 断熱変化と大気の安定性
PART3 雲と降水
PART4 フェーン現象

第14講 大気の運動
PART1 地上天気図と等圧面天気図
PART2 空気塊にはたらく力
PART3 地衡風
PART4 傾度風と地上風
PART5 局地風
PART6 季節風
PART7 熱帯低気圧と台風
PART8 偏西風波動と温帯低気圧
PART9 高気圧

第15講 海洋
PART1 海流
PART2 熱塩循環と海水の鉛直構造
PART3 波
PART4 潮汐

第16講 大気・海洋の変動
PART1 対流圏と成層圏の変動
PART2 大気による物質輸送
PART3 都市とその周辺の大気
PART4 物質循環

第17講 日本列島の今・昔
PART1 現在の日本近海の海洋環境
PART2 現在の日本列島の気象
PART3 日本列島の地質
PART4 新生代の日本列島

第18講 惑星の運動と見え方
PART1 地球の自転と公転
PART2 ケプラーの法則
PART3 天球と太陽の動き
PART4 時刻と暦
PART5 惑星の視運動

第19講 太陽系の天体
PART1 太陽の構造
PART2 太陽の表層
PART3 太陽活動の地球への影響
PART4 太陽系の惑星
PART5 太陽系のさまざまな天体

第20講 恒星
PART1 天体の等級
PART2 恒星のスペクトル型
PART3 HR図
PART4 主系列星の質量と寿命
PART5 太陽質量の恒星の一生
PART6 さまざまな恒星の一生
PART7 星団
PART8 連星

第21講 銀河と宇宙
PART1 銀河系の構造
PART2 銀河系の天体の運動
PART3 さまざまな銀河
PART4 宇宙の距離はしご
PART5 宇宙の階層構造
PART6 ハッブル・ルメートルの法則
PART7 宇宙の誕生と進化

第22講 地学のための基礎知識
PART1 地学のための数学
PART2 地学のための物理
PART3 地学のための化学
PART4 地学のための地理

第 12 講　地球表層の熱収支
PART1 シュテファン・ボルツマンの法則

目標　天体の表面温度と放射エネルギーとの関係について説明できる。

Chapter1　シュテファン・ボルツマンの法則

恒星や惑星などの天体は，表面から電磁波を放射しています。ここでは，その放射の大きさと天体の表面温度との関係について学びましょう。

黒体放射と絶対温度

・黒体

入射する電磁波をまったく反射せず，すべて吸収する物体を**黒体**という。

厳密に黒体である物体は存在しないが，太陽などの恒星はほぼ黒体とみなすことができる。また，惑星の放射も近似的に黒体とみなして計算されることが多い。

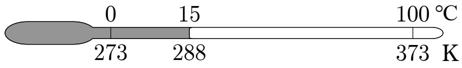
・黒体放射

ある環境に十分長い時間おかれて安定した黒体は，自分自身の温度に応じた電磁波を放射する。この放射を**黒体放射**という。

・絶対温度

気体の分子の運動は，温度が低くなるにつれて穏やかになっていく。理論上その運動が完全に停止すると考えられる温度を**絶対零度**といい，約－273℃である。

絶対温度〔熱力学温度：K（ケルビン）〕は，目盛りの幅を摂氏温度〔セルシウス温度：℃〕と同じにして，絶対零度を 0K とした温度の表し方である。



シュテファン・ボルツマンの法則

・単位表面積からの放射エネルギー

表面の絶対温度が T である黒体の単位表面積から単位時間に放射されるエネルギーを E とする。このとき，E は（T / T の４乗）に（比例 / 反比例）して，

$$E=\sigma T^4$$

と表せる〔ただし，σ（シグマ）はシュテファン・ボルツマン定数で，$\sigma=5.67\times10^{-8}\,\mathrm{W/(m^2\cdot K^4)}$〕。これを**シュテファン・ボルツマンの法則**という。

知っておこう

W（ワット）は仕事率の単位，J（ジュール）は仕事またはエネルギーの単位であり，

1W=1J/s

が成り立ちます。つまり，W は単位時間あたりのエネルギーを表しているといえます。

知っておこう

1879 年，オーストリアのシュテファン（Josef Stefan）は，それまでの研究者が発表した実験結果をもとにして，物体の放射するエネルギーが絶対温度の 4 乗に比例する，という関係式を発表しました。

その後，1884 年にはシュテファンの弟子にあたるボルツマン（Ludwig Boltzmann）が，シュテファンの発表した関係式の理論的な裏付けを示しました。

まとめ

・物体に対して入射する電磁波をまったく＿＿＿せず，すべて＿＿＿する物体を黒体という。

・絶対温度は，目盛りの幅を摂氏温度〔℃〕と同じにして，絶対零度〔約＿＿＿℃〕を 0K とした温度の表し方である。

・黒体の単位表面積から単位時間に放射されるエネルギーは絶対温度の＿＿乗に＿＿＿＿して，これを＿＿＿＿＿＿の法則という。

Chapter2　演習問題

　ここでは，シュテファン・ボルツマンの法則について，太陽放射を例として確認しましょう。ただし，以下の「エネルギー」は，すべて単位時間あたりのエネルギーを表すものとします。

問題⑴　太陽定数について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

　地球の大気上端において，太陽放射に（平行 / 垂直）な単位面積の面が受ける太陽放射のエネルギーを太陽定数という。

　地球と太陽との距離を r とする。太陽から r だけ離れた地点をすべて集めたものは半径 r の球面であり，その表面積は（$2\pi r$ / πr^2 / $4\pi r^2$ / $\frac{4}{3}\pi r^3$）である。また，この球面上のすべての地点では，太陽と球面上の地点を結ぶ線分と球面が（平行 / 垂直）である。つまり，この球面上のすべての点について，単位面積が受ける太陽放射のエネルギーは太陽定数と等しいといえる。

問題⑵　太陽定数と太陽が放射するエネルギーとの関係について述べた次の文章中の空欄［　**ア**　］に入る式を答えましょう。式には文章中にある文字を用いてください。

　太陽から放射された電磁波は空間内のすべての方向に伝わっていき，**問題⑴**で考えた半径 r の球面全体へと同時に到達する。つまり，太陽全体から放射されるエネルギーの総量は，半径 r の球面全体へと到達するエネルギーの総量と等しい。

　よって，太陽全体から放射されるエネルギーの総量を L，太陽定数を S_0 とすると，L =［　**ア**　］が成り立つ。

問題⑶　太陽の放射するエネルギーについて述べた次の文章中の空欄［　**イ**　］～［　**エ**　］に入る式を答えましょう。式には文章中にある文字を用いてください。

太陽の表面温度を T とする。シュテファン・ボルツマンの法則により，太陽の単位表面積から放射されるエネルギーは［　**イ**　］である（ただし，σ はシュテファン・ボルツマン定数)。

また，太陽は球体とみなすことができる。太陽の半径を R とすると，太陽の表面積は［　**ウ**　］である。

よって，太陽全体から放射されるエネルギーの総量を L とすると，$L=$［　**エ**　］が成り立つ。

問題⑷　太陽の表面温度について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。また，空欄［　**オ**　］に入る式を答えましょう。式には文章中にある文字を用いてください。

問題⑵と問題⑶において異なる式で表した L は一致する。このことから，$T=$［　**オ**　］と表せることがわかる。

$S_0 = 1.4\times10^3$ W/m^2，$\sigma = 5.7\times10^{-8}$ W/(m^2・K^4)，$r = 1.5\times10^{11}$ m，$R = 7.0\times10^8$ m として上から一桁の概数で T の値を求めると，(300K ／ 600K ／ 3000K ／ 6000K）が得られる。

第 12 講　PART1　確認問題

問 1　黒体とは，入射する電磁波をすべて（　ア　）する物体のことである。太陽などの恒星は，ほぼ黒体とみなすことができる。十分に長い時間，一定の環境に置かれて安定した黒体は，自分自身の（　イ　）に応じた電磁波を放射する。これを黒体放射という。

表面の絶対温度が T〔K〕の黒体の単位表面積から単位時間に放射されるエネルギー E〔J〕について，a シュテファン・ボルツマンの法則が成り立つ。

(1)　空欄ア，イに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ア：反射　　イ：温度
②　ア：反射　　イ：質量
③　ア：吸収　　イ：温度
④　ア：吸収　　イ：質量

(2)　下線部 a を表す式として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。ただし，σは定数とする。

①　$E=\frac{\sigma}{T^4}$
②　$E=\frac{\sigma}{T}$
③　$E=\sigma T$
④　$E=\sigma T^4$

＜ Note ＞

PART2 ウィーンの変位則

目標　天体の表面温度と放射する電磁波の波長との関係について説明できる。

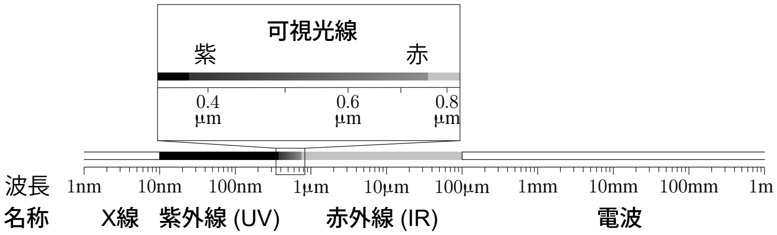
Chapter1　ウィーンの変位則

天体の表面温度が変化すると，放射する電磁波のエネルギーだけでなく波長も変化します。ここでは，天体の表面温度と放射する電磁波の波長との関係について学びましょう。

スペクトル

・電磁波の波長と色

電磁波は波長によって分類されている。おおむね人間の目によって見える波長帯の光を可視光線といい，赤色光の波長とくらべて青色光の波長の方が（長い / 短い）。



覚えておこう

電磁波の波長の単位としては，
1mm = 10^{-3}m
1μm = 10^{-6}m
1 nm = 10^{-9}m
がよく使われます。単位変換ができるように，しっかりと覚えておきましょう。

・分光

物体の放射する電磁波は，さまざまな波長の電磁波が混ざり合ったものである。このような電磁波を波長ごとに分けることを**分光**という。

知っておこう

プリズムは，屈折率が波長によって異なることを用いて分光を行うことのできる器具です。

・スペクトル

電磁波を波長ごとに分けたものを**スペクトル**という。太陽光のスペクトルは，虹のような光の帯として観察される。

また，波長と放射エネルギーの強さの関係を表すグラフもスペクトルと呼ばれることがある。

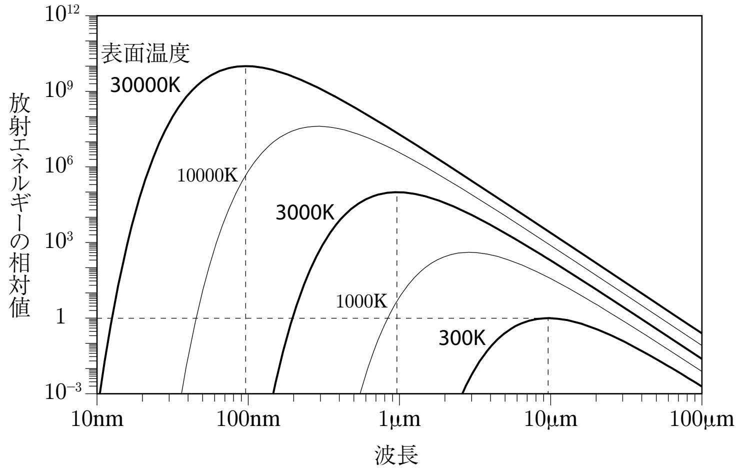
ウィーンの変位則

・放射エネルギーが最大となる波長

表面の絶対温度が T である黒体について，放射エネルギーが最も大きくなる波長を λ（ラムダ）とする。このとき，λ は（T / T の 4 乗）に（比例 / 反比例）して，

$$\lambda T = b$$

と表せる（ただし，b は定数で，$b = 2.9 \times 10^{-3}\,\mathrm{m \cdot K}$）。これを**ウィーンの変位則**という。



知っておこう

1893 年，ドイツのウィーン（Wilhelm Wien）は，現在ウィーンの変位則と呼ばれている法則を示しました。

その後ウィーンは左に示されているようなスペクトルを表す近似式も導きましたが，一部の波長では不正確でした。ドイツのプランク（Max Planck）が 1900 年に発表したプランクの法則は，このずれを解消するとともに量子論という新しい物理学の考え方のきっかけとなりました。

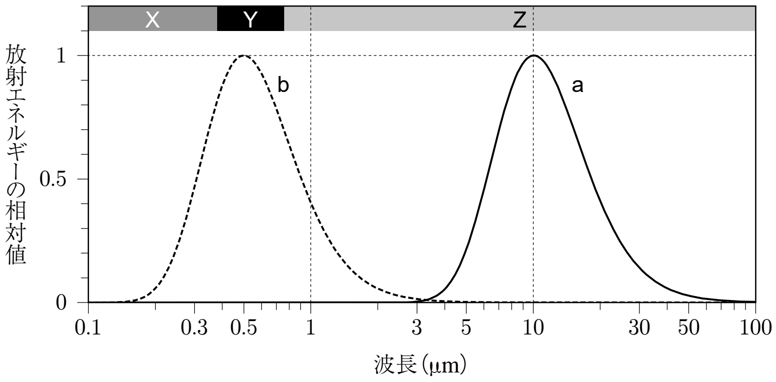
まとめ

・電磁波を波長ごとに分けることを______といい，それによって得られるものを__________という。

・黒体から放射されるエネルギーが最も大きくなる波長は表面の絶対温度に_______して，これを______________という。

Chapter2　演習問題

　次の図は，地球と太陽の放射のスペクトルを示したものです。この図を例にして，ウィーンの変位則について確認しましょう。ただし，図の縦軸は，それぞれのスペクトルについて，放射エネルギーの最大値を 1 としたときの値〔相対値〕を表しています。



問題⑴　図中の X，Y，Z には，それぞれ電磁波の名称が入ります。それぞれの名称を答えましょう。

問題⑵　図中の a，b は，それぞれ地球と太陽の放射のスペクトルのうちいずれかを表しています。地球の放射のスペクトルを表しているものはどちらか，記号で答えましょう。

ここがPOINT

地球と太陽の放射の大まかな波長については地学基礎でも学んでおり，重要な知識です。
　ただし，ここでは温度の異なる 2 つの天体からの放射のスペクトルを比較するので，ウィーンの変位則をもとに考えて答えることもできますね。

問題⑶　太陽の表面温度について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。また，空欄［ **ア** ］～［ **エ** ］に入る数値をそれぞれ上から 1 桁の概数で答えましょう。

　地球の表面温度は平均すると約 15℃であり，これを絶対温度で表すと約［ **ア** ］K である。

　ここで，それぞれのスペクトルについて，放射されるエネルギーが最も大きくなる波長を λ とする。図中の **a** の λ は約［ **イ** ］μm，**b** の λ は約［ **ウ** ］μm と読み取れる。ウィーンの変位則によると表面の絶対温度は（λ ／ λ^4 ／ $\sqrt[4]{\lambda}$）に（比例 ／ 反比例）するので，太陽の表面温度は約［ **エ** ］K と推定される。

第12講 PART2　確認問題

問１　a 電磁波は波長によって分類されている。物体が放射する電磁波は，さまざまな波長の電磁波が混ざり合っており，これを波長ごとに分けることを（　ア　）という。また，電磁波を波長ごとに分けたものを（　イ　）という。

(1)　下線部ａについて，人間の目で見える波長帯の光を何というか。最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。
①　紫外線　　②　赤外線　　③　電波　　④　可視光線

(2)　空欄ア，イに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。
①　ア：分光　　イ：スペクトル
②　ア：分光　　イ：プリズム
③　ア：屈折　　イ：スペクトル
④　ア：屈折　　イ：プリズム

問２　黒体表面の絶対温度 T〔K〕と，放射エネルギーが最大となる波長 λ〔m〕の間には（　ウ　）という関係式が成り立つ。これをウィーンの変位則という。

(1)　空欄ウに入る式として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。ただし，b は定数とする。
①　$\lambda T=b$
②　$\lambda T^4=b$
③　$\lambda=bT$
④　$\lambda=bT^4$

⑵　ウィーンの変位則によると，表面温度が高いほど，放射エネルギーが最大となる波長はどうなるか。最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　長くなる。

②　短くなる。

③　長くなることも短くなることもある。

④　表面温度によらず一定である。

PART3 地球の全球熱収支と温室効果

目標　地球の大気と地表を分けたときの全球熱収支と，温室効果の原理について説明できる。

Chapter1　地球の全球熱収支

地球と宇宙空間の間の熱のやりとりは，放射によって行われています。地球の受け取る放射エネルギーと地球から放射されるエネルギーがつり合っている条件について，少し詳しく見ていきましょう。

放射平衡温度

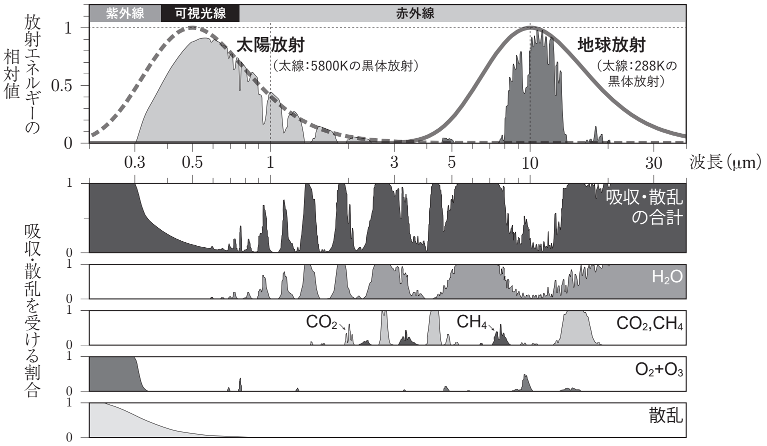
・大気による放射の吸収と散乱

大気中の分子は，その内部の結合に応じた特定の波長の電磁波を吸収する。また，可視光から紫外線にかけての波長の短い電磁波は，大気中の分子による散乱を受けやすい。

吸収の例

水蒸気，二酸化炭素，メタン……おもに（紫外線 / 赤外線）

オゾン……おもに（紫外線 / 赤外線）



知っておこう

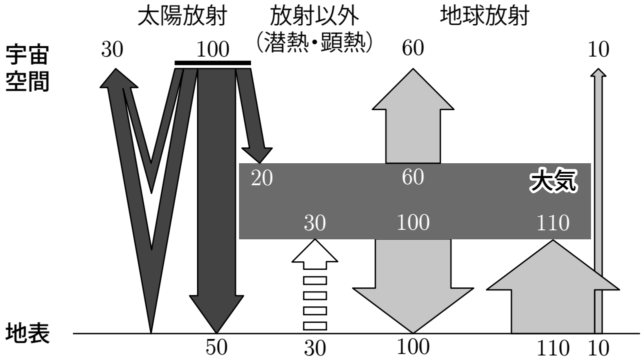
大気による吸収・散乱をあまり受けない波長領域は**大気の窓**と呼ばれています。赤外線領域の大気の窓としては，波長 10μm 前後の波長領域が代表的です。

大気の窓の波長領域は，気象衛星から地表を観測したり，地表から宇宙の天体を観測したりする際に利用されています。

・地球の全球熱収支

ある領域についての熱収支を考えたとき，正味で受け取るエネルギーが正であれば，温度が（上昇 / 低下）する。

地球全体，あるいは大気や地表の温度が長期的にほぼ一定となっていることからは，地球全体でみたときだけでなく，大気や地表のそれぞれについても，受け取るエネルギーと失うエネルギーがほぼ等しいと推定される。



知っておこう

左の図の「宇宙空間」は，地球の大気上端と考えてかまいません。

また，地学基礎でも学んだように，**潜熱**は水の状態変化に伴って輸送されるエネルギー，**顕熱**は状態変化を伴わずに輸送されるエネルギーです。

・温室効果

可視光線をよく通すが，赤外線を吸収する性質のある気体を**温室効果ガス**とよぶ。地球の大気中の温室効果ガスとしては，多く含まれる順に水蒸気，二酸化炭素，メタンが挙げられる。

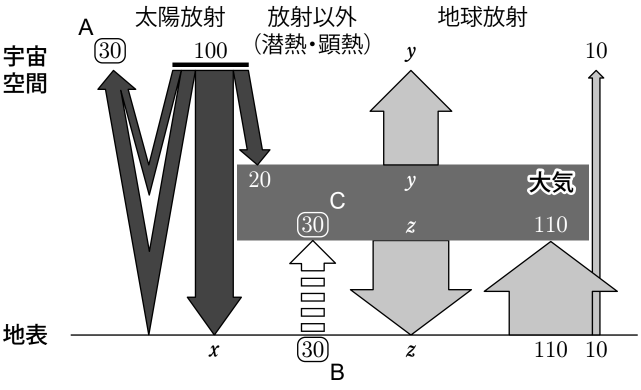
大気中の温室効果ガスは地表からの赤外線を吸収し，さまざまな方向に（可視光線 / 赤外線）として（反射 / 放射）する。その赤外線は地表によって吸収され，地表の温度を上昇させる。温室効果ガスのもつこのようなはたらきを**温室効果**という。

まとめ

・地球全体でみたときだけでなく，大気や地表のそれぞれについても，受け取るエネルギーと失うエネルギーはほぼ等しい。
・温室効果とは，温室効果ガスが地表からの________を吸収し，________を放射することで地表の温度を上昇させるはたらきである。

Chapter2　演習問題

　ここでは，地球の熱収支について，具体的な数値を用いて見ていきましょう。次の図は，宇宙空間・大気・地表における地球全体のエネルギーのやり取りを模式的に表したものです。ただし，数値は宇宙空間から地球の大気上端に入射する太陽放射のエネルギーを 100 とした値です。また，以下では宇宙空間・大気・地表において，エネルギーのつり合いが成り立っているものとします。



問題(1)　地球の大気上端に入射する太陽放射のエネルギー 100 のうち，反射されるエネルギー〔図中の A の 30〕の占める割合を何と呼ぶか，カタカナで答えましょう。

問題(2)　温室効果について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

　地球の大気は温室効果ガスを含み，地表から放射された（可視光線 / 赤外線）の約（1 割 / 9 割）を吸収する。このエネルギーは（可視光線 / 赤外線）としてさまざまな方向に放射され，地表はその一部を吸収する。これによって地表の温度を上昇させるはたらきを温室効果という。

問題⑶ 図中のBからCへのエネルギーの輸送について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

ここで輸送されるエネルギーのうち約８割は潜熱，すなわち水の状態変化に伴ってやりとりされる熱の輸送である。

地表で水が液体から気体に変化するとき，水分子は（周囲からエネルギーを受け取る / 周囲にエネルギーを放出する）。気体の水が上空へともたらされて冷却されると，水は気体から液体や固体へと変化する。このとき,水分子は（周囲からエネルギーを受け取る / 周囲にエネルギーを放出する）。

このように考えると，地表面に存在した水が上空へともたらされ，そこで雲や降水となることによって，地表から大気へと熱が輸送されるといえる。これが，BからCへの潜熱輸送である。

問題⑷ 図中の宇宙空間・大気・地表においてエネルギーのつり合いが成り立っていることを用いて，x，y，zの値を求めましょう。

第12講 PART3 確認問題

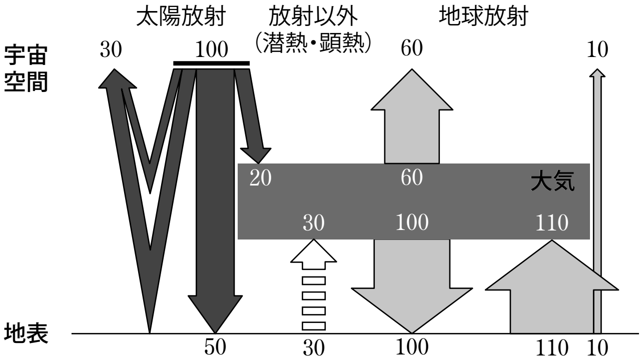
問1 次の文章を読み，下の問いに答えよ。

地球は宇宙空間との間で熱のやりとりをしており，地球が吸収するエネルギーと放出するエネルギーがつり合っている。地球全体だけでなく，大気や地表のそれぞれについても，aエネルギーの収支がつり合っている。

大気中の分子は，その種類によって特定の波長の電磁波を吸収する。おもに赤外線を吸収するのは（　ア　），おもに紫外線を吸収するのは（　イ　）である。

温室効果ガスとは，（　ウ　）をよく通すが，（　エ　）を吸収する性質のある気体のことである。地球の大気中に最も多く含まれる温室効果ガスは（　オ　）である。

(1) 下線部aについて，次の図は，地球が受けとる太陽放射のエネルギーを100としたときの地球のエネルギー収支を表している。地球の大気が吸収するエネルギーとして最も適当な数値を，下の①～④のうちから一つ選べ。



① 20　　② 50
③ 110　　④ 160

⑵ 空欄ア，イに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① ア：二酸化炭素，メタン　イ：水蒸気，オゾン

② ア：水蒸気，オゾン　イ：二酸化炭素，メタン

③ ア：水蒸気，二酸化炭素，メタン　イ：オゾン

④ ア：オゾン　イ：水蒸気，二酸化炭素，メタン

⑶ 空欄ウ，エに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① ウ：赤外線　エ：紫外線

② ウ：赤外線　エ：可視光線

③ ウ：可視光線　エ：紫外線

④ ウ：可視光線　エ：赤外線

⑷ 空欄オに入る語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① 二酸化炭素　② メタン

③ 水蒸気　④ 酸素

PART4 地球の放射平衡温度

目標 地球の放射平衡温度とは何か，正しく説明できる。

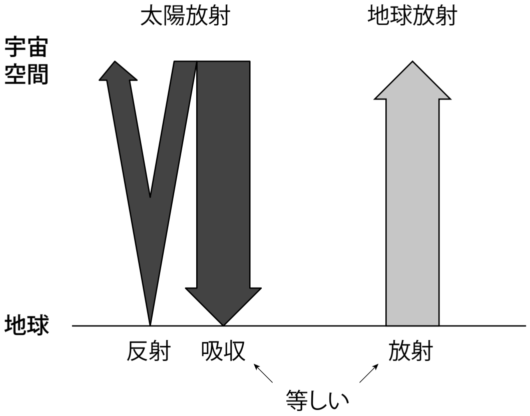
Chapter1　地球の放射平衡温度

地球と宇宙空間の間の熱のやりとりは，放射によって行われています。地球の受け取る放射エネルギーと地球から放射されるエネルギーがつり合っている条件について，少し詳しく見ていきましょう。

放射平衡温度

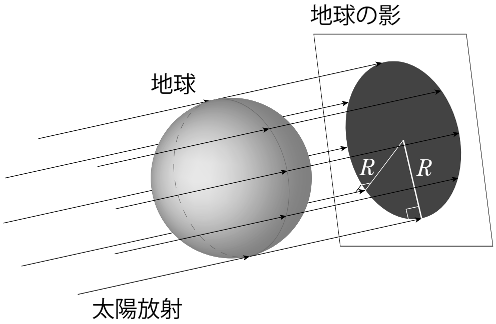
・放射平衡温度とは

天体の受け取る放射エネルギーと，天体から放射されるエネルギーが等しくなるような温度を**放射平衡温度**という。



地球の放射平衡温度は，地球に（海 / 大気）がないと考えたときの地表面の温度に対応する。

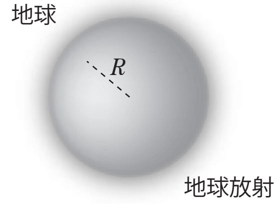
・地球の受け取る放射エネルギー



　地球に対して単位時間に入射する放射エネルギーの総量は，地球が遮る太陽放射の総量と等しい。これは，地球の半径を R としたとき，太陽定数に（πR^2　/ $2\pi R^2$　/ $4\pi R^2$）を掛けたものにあたる。

　地球はその放射のすべてを吸収するわけではなく，一部を反射する。入射した放射エネルギーに対して反射するエネルギーの占める割合を**アルベド**という。地球のアルベドは，約（0.3 / 0.7）である。

・地球の放射するエネルギー



　地球が単位時間に放射するエネルギーの総量は，地球の半径を R としたとき，単位表面積から放射されるエネルギーの平均値に（πR^2　/ $2\pi R^2$　/ $4\pi R^2$）を掛けたものにあたる。

・地球の放射平衡温度

　地球の放射平衡温度は約（255K / 300K）と求められて，これは実際の地表面の平均温度より（12K / 33K）程度（高い / 低い）。この違いをもたらす最大の原因は，地球の大気による温室効果である。

まとめ

・天体の受け取る放射エネルギーと，天体から放射されるエネルギーが等しくなるような温度を____________という。

・地球の大気は________をもつため，実際の地表面の平均温度は地球の放射平衡温度より 30K 以上高い。

Chapter2　演習問題

ここでは，地球の放射平衡温度を実際に求めてみましょう。以下では地球の半径を R，太陽定数を S_0，シュテファン・ボルツマン定数を σ，円周率を π とします。

問題(1)　地球の受け取る放射エネルギーについて述べた次の文章中の空欄［　**ア**　］・［　**イ**　］に入る式を答えましょう。

地球に対して単位時間に入射する放射エネルギーの総量は，地球が遮る太陽放射の総量と等しい。このことから，地球に対して単位時間に入射する放射エネルギーの総量は R，S_0，π を用いて［　**ア**　］と表せる。

地球はその放射のすべてを吸収するわけではなく，一部を反射する。地球のアルベドを A とおくと，地球が単位時間に吸収する放射エネルギーの総量は R，S_0，π，A を用いて［　**イ**　］と表せる。

ここがPOINT

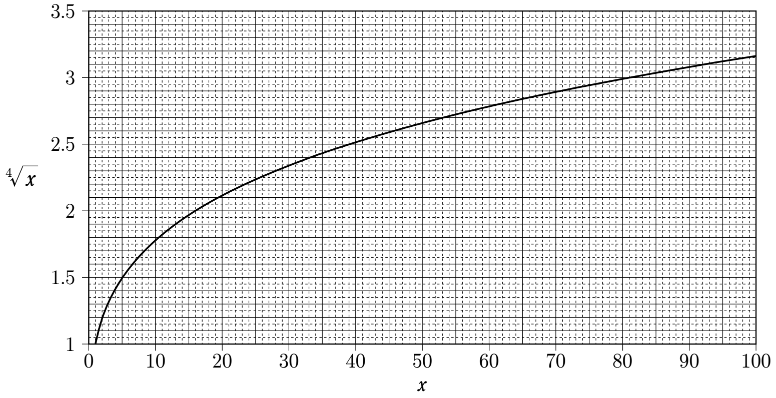
アルベド A は反射率なので，地球に入射したエネルギーのうち地球が吸収するエネルギーの占める割合は $1-A$ と表せます。

問題(2)　地球の放射するエネルギーについて述べた次の文章中の空欄［　**ウ**　］・［　**エ**　］に入る式を答えましょう。

地球を表面温度が T の黒体であると考えよう。このとき，地球の単位表面積から単位時間に放射されるエネルギーは T，σ を用いて［　**ウ**　］と表せる。よって，地球が単位時間に放射するエネルギーの総量は R，T，σ，π を用いて［　**エ**　］と表せる。

問題(3)　**問題(1)**と**問題(2)**の結果をもとにして，地球の放射平衡温度を R，S_0，π，A，σ のうち必要なものを用いた式で表しましょう。

問題(4)　$R = 6.4 \times 10^3$ km，$S_0 = 1.4 \times 10^3$ W/m^2，$\pi = 3.1$，$A = 0.31$，$\sigma = 5.7 \times 10^{-8}$ W/(m^2・K^4) とします。このとき，地球の放射平衡温度は何 K でしょうか。また，それは何℃でしょうか。**問題(3)**の結果を用いて，それぞれ整数値で答えましょう。必要であれば，x と $\sqrt[4]{x}$ の関係を表す次の図を用いてください。



第12講　PART4　確認問題

問1　次の文章を読み，下の問いに答えよ。

地球に対して単位時間に入射する太陽放射のエネルギーの総量は，（　ア　）$\times \pi R^2$ と表される。ただし，R は地球の半径である。地球に入射した放射エネルギーに対して反射するエネルギーの占める割合を（　イ　）といい，地球全体での平均値は約（　ウ　）である。

(1)　空欄ア，イに入る語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ア：放射平衡温度　　イ：太陽定数
②　ア：放射平衡温度　　イ：アルベド
③　ア：太陽定数　　イ：放射平衡温度
④　ア：太陽定数　　イ：アルベド

(2)　空欄ウに入る数値として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　0.1　　②　0.3　　③　0.6　　④　0.9

問2　次の文章を読み，下の問いに答えよ。

天体が吸収するエネルギーと放射するエネルギーが等しくなるときの温度を放射平衡温度という。地球の放射平衡温度は約 255 K と計算され，これは地表面の平均温度より（　エ　）。

(1)　空欄エに入る語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　18 K 程度高い　　②　18 K 程度低い
③　33 K 程度高い　　④　33 K 程度低い

⑵　地球の放射平衡温度と地表面の平均温度との間の違いの最大の原因は何か。最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　温室効果　　②　海流

③　地球の自転　　④　地球の公転

第 13 講　大気の構造

PART1 大気の組成

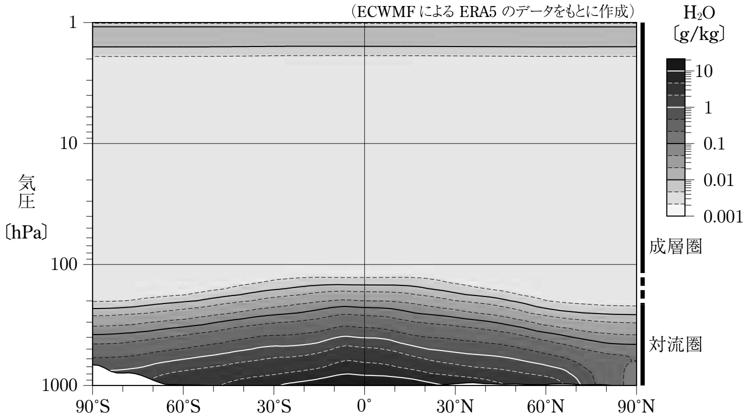
目標　水蒸気の鉛直分布や緯度分布と，二酸化炭素の季節変動の原因について説明できる。

Chapter1　大気の組成

地球の大気は，気温の鉛直分布をもとに区分されています。ここでは，気温の鉛直分布に大きく影響する大気中の成分について学びましょう。

●水蒸気の分布

・水蒸気の鉛直分布



→水蒸気は対流圏の下層に局在していて，特に低緯度に多い。

・水蒸気の分布と飽和水蒸気圧

地球の表面の約（3 割 / 7 割）は海であり，飽和水蒸気圧に達するまで大気に水蒸気を供給できる。

→飽和水蒸気圧は温度が高いほど大きいので，対流圏の下層のうち特に低緯度の大気に水蒸気が多く含まれる。

覚えておこう

地学基礎でも学んだように，気圧は上空ほど低くなります。

約 5500m 上昇するごとに気圧が半分になる，あるいは，約 16km 上昇するごとに気圧が 10 分の 1 になることを覚えておくとよいでしょう。

左の図の上端は，地表から見て 10 分の 1 を 3 回くり返した場所，すなわち上空約 48km なので，成層圏と中間圏の境界付近にあたります。

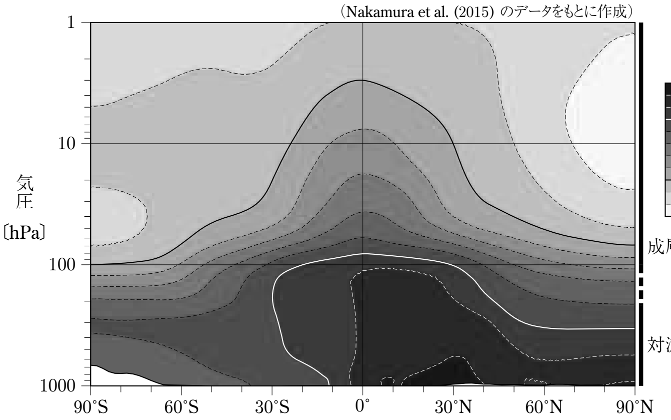
知っておこう

左の図の g/kg は不思議な単位にも見えますが，「1kg の大気に何 g の水蒸気が含まれるか」を表します。

低緯度の地表付近では 1kg の大気に 10g 程度の水蒸気が含まれていますが，その上空の対流圏の上層では 1kg の大気に 0.01g 程度しか水蒸気が含まれていないのです。

●二酸化炭素の分布

・二酸化炭素の鉛直分布



覚えておこう

地学基礎で学んだように，水蒸気を除く大気の主成分とその割合は，対流圏から中間圏までほぼ一定となっています。

左の図では二酸化炭素の濃度が場所によって大きく異なるようにも見えますが，380ppm 程度の値に対して±数 ppm しか違わないことに注意しましょう。水蒸気の分布と比較してみると，違いがわかりやすいですね。

→二酸化炭素濃度の緯度や高度による違いは非常に小さい。

・二酸化炭素の季節変動

植物は光合成によって二酸化炭素を（消費 / 放出）する。そのため，光合成が盛んになる夏には大気中の二酸化炭素が（増加 / 減少）し，冬には（増加 / 減少）する。

まとめ

- 地球の大気の水蒸気は＿＿＿＿圏の下層に局在しており，特に＿＿緯度に多い。
- 水蒸気の分布は，温度が高いほど＿＿＿＿＿＿＿＿が大きいことによって説明できる。
- 地球の対流圏から中間圏までにおいて，二酸化炭素濃度の緯度や高度による違いは非常に小さい。
- 二酸化炭素は植物の＿＿＿＿＿によって消費されるため，大気中の二酸化炭素は季節によって変動する。

Chapter2　演習問題

ここでは，大気中の二酸化炭素について確認しましょう。

問題⑴　地球の大気中の二酸化炭素について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

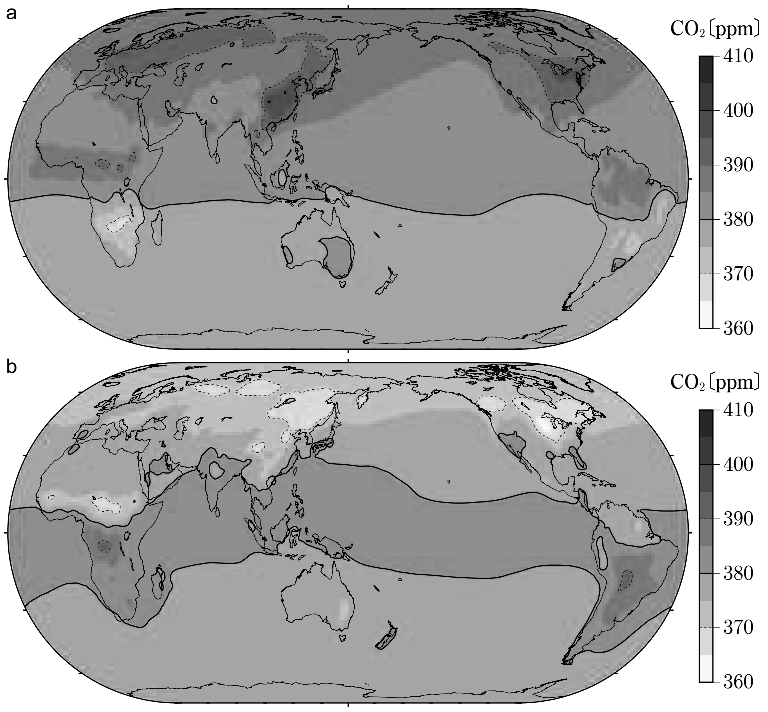
地球の乾燥大気〔水蒸気を除く大気〕の成分のうち，二酸化炭素は（3 番目 / 4 番目）に多く含まれるものである。その割合はおよそ（4% / 0.4% / 0.04%）であり，対流圏から（中間圏 / 熱圏）までの間でほぼ一定の値となっている。

問題⑵　二酸化炭素濃度の季節変動について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

日本列島のように季節をもつ中緯度～高緯度の陸上では，植物の活動が季節によって大きく異なる。すなわち，太陽放射を多く受け取る夏には冬とくらべて光合成を活発に行うため，二酸化炭素を正味で多く（放出 / 吸収）する。このことは，二酸化炭素濃度の季節変動の原因となる。

ここで，地球の南北半球を比較すると，陸地の占める割合は（北半球 / 南半球）の方が大きい。そのため，二酸化炭素濃度の季節変動は（北半球 / 南半球）の方が大きいと予想される。

問題⑶　次の**a**と**b**は，それぞれ２月または８月における二酸化炭素濃度を表しています。これらのうち，８月のものはどちらでしょうか。判断の理由とともに答えましょう。



（Nakamura et al. (2015) のデータをもとに作成）

第13講　PART1　確認問題

問１　次の文章を読み，下の問いに答えよ。

地球の大気中に含まれる水蒸気は，（　ア　）の下層に局在している。飽和水蒸気圧は温度が高いほど大きいので，（　ア　）の下層のうち，特に（　イ　）の大気に水蒸気が多く含まれる。

一方，二酸化炭素濃度は，緯度や高度による違いは非常に小さいが，a季節による変動が見られる。

(1)　空欄ア，イに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ア：対流圏　　イ：低緯度
②　ア：対流圏　　イ：高緯度
③　ア：成層圏　　イ：低緯度
④　ア：成層圏　　イ：高緯度

(2)　下線部 a に関する説明として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　動植物の呼吸の影響で，夏に低下し，冬に上昇する。
②　動植物の呼吸の影響で，夏に上昇し，冬に低下する。
③　植物の光合成の影響で，夏に低下し，冬に上昇する。
④　植物の光合成の影響で，夏に上昇し，冬に低下する。

＜ Note ＞

PART2 断熱変化と大気の安定性

目標 乾燥断熱減率, 湿潤断熱減率, 条件付き不安定とは何か, それぞれ説明できる。

Chapter1 断熱変化

空気塊を上空に持ち上げると，温度が低下します。ここでは，空気塊の温度変化の原因について学びましょう。

断熱変化とは

・**内部エネルギー** 物理基礎

気体の内部では原子や分子が飛び回り，それらの粒子は運動エネルギーと位置エネルギーをもっている。それらのエネルギーの和を気体の**内部エネルギー**という。

・**熱力学の第 1 法則** 物理基礎

気体に対して与えられる熱量を Q，外部から行われる仕事を w とすると，気体の内部エネルギーの変化 ΔU は

$$\Delta U = Q + w$$

と表せる。

・**断熱変化**

空気は熱を（伝えやすい / 伝えにくい）物質であり，空気塊は周囲と熱のやり取りを行わないとみなせる。そのような状態を保って空気塊の温度や体積が変化することを**断熱変化**という。

断熱変化は熱力学の第 1 法則の式で $Q = 0$ とすることに相当し，

$$\Delta U = w$$

となる。

→断熱変化において，内部エネルギーの変化量は外部から行われる仕事と等しい。

知っておこう

内部エネルギーを考えるときの「位置エネルギー」は，気体内部の粒子どうしの間にはたらく力によるエネルギーを指しています。地球など，外部の物体の重力による位置エネルギーとは異なることに注意しましょう。

知っておこう

物体に力を加えて動かすことを「仕事をする」といいます。仕事は力の大きさと移動距離との積で表され，単位は N・m，すなわち J となります。

エネルギー，熱，仕事の単位が同じであることに注意しましょう。

●乾燥断熱減率と湿潤断熱減率

・乾燥断熱減率

水蒸気で飽和していない空気塊が上昇するとき，以下に示すような原理で温度が低下していく。このときの温度の低下率を**乾燥断熱減率**という。乾燥断熱減率の値は条件によらずほぼ一定で，約 10K/km〔約 1.0℃ /100m〕である。

空気塊を上空に持ち上げる
→気圧の低下に伴って空気塊は膨張する
→空気塊は周囲の空気を押しのける
→このとき，外部から行われる仕事 w は（正 / 負）となる
→断熱変化を考えると，ΔU は（正 / 負）となる
→内部エネルギーが（増加 / 減少）し，空気塊の温度が低下する

・湿潤断熱減率

水蒸気で飽和した空気塊が上昇するとき，温度の低下に伴って水蒸気が水や氷へと状態変化する。このとき，水分子は空気塊へと潜熱を放出するため，空気塊の温度の低下は抑えられる。このときの温度の低下率を**湿潤断熱減率**という。湿潤断熱減率の値は条件によって異なるが，約 5K/km〔約 0.5℃ /100m〕とされることが多い。

知っておこう

大気の鉛直方向の運動を考えるとき,「乾燥」という表現は「空気塊に水蒸気が含まれていない」という意味ではなく,「飽和に達しておらず，水蒸気の状態変化を考えなくてよい」という意味で用いられます。

覚えておこう

水蒸気から水への状態変化を**凝結**，水蒸気から氷への状態変化を**凝華**といいます。

まとめ

・空気塊が上空へと持ち上げられると，気圧の変化に伴って空気塊は_____し，内部エネルギーが_____する。
・水蒸気で飽和していない空気塊が上昇するときの温度の低下率を__________といい，水蒸気で飽和した空気塊が上昇するときの温度の低下率を__________という。
・空気塊が水蒸気で飽和しているとき，水の状態変化によって_____が放出されるため，温度の低下は抑えられる。

Chapter2　大気の安定性

上昇気流は，風が山地にぶつかることで生じることもありますが，平地で自然に生じることもあります。ここでは，大気の鉛直方向の運動の原因について学びましょう。

大気の安定性

・**シャルルの法則** (物理・化学)

圧力が一定のとき，一定質量の気体の体積は絶対温度に比例する。これをシャルルの法則という。

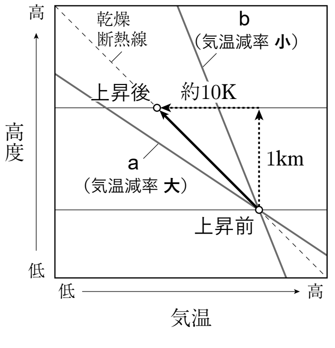
・**気体の温度と密度**

シャルルの法則より，同じ高度では温度が高いほど気体の密度は（大きい / 小さい）といえる。

・**空気塊の上昇と下降**

空気塊の温度	周囲より低い	周囲と同じ	周囲より高い
空気塊の密度	周囲より（ 大 / 小 ）	周囲と同じ	周囲より（ 大 / 小 ）
空気塊の運動	（上昇 / 下降）	停止	（上昇 / 下降）

・**乾燥した空気塊に対する安定性**



周囲と同じ温度の空気塊を少しだけ持ち上げたとする。このとき，空気塊の温度は乾燥断熱減率にしたがって低下する。

周囲の気温の低下率〔これを**気温減率**という〕が乾燥断熱減率より大きければ〔図のa〕，上昇後の空気塊の温度は周囲よりも（高く / 低く），空気塊は自然とさらに上昇しようとする。このとき，大気は乾燥した空気塊に対して**不安定**であるという。

一方，周囲の気温減率が乾燥断熱減率より小さければ〔図のb〕，上昇後の空気塊の温度は周囲よりも（高く / 低く），空気塊は下降して元の高度に戻ろうとする。このとき，大気は乾燥した空気塊に対して**安定**であるという。

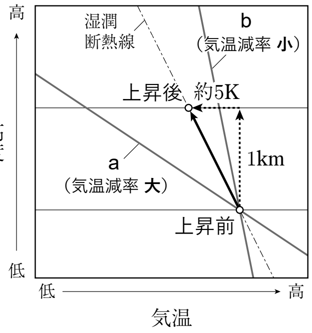
知っておこう

乾燥（湿潤）断熱線は，乾燥（湿潤）断熱減率にしたがう温度変化を表します。

・**飽和した空気塊に対する安定性**

周囲と同じ温度の空気塊を少しだけ持ち上げたとする。このとき，空気塊の温度は湿潤断熱減率にしたがって低下する。

乾燥した空気塊に対する安定性と同じように考えて，周囲の気温減率と湿潤断熱減率との大小関係によって大気は飽和した空気塊に対して**不安定**である〔図の a〕，または**安定**である〔図の b〕という。



・**大気の安定性の分類**

周囲の気温減率をΓ，乾燥断熱減率をΓ_d，湿潤断熱減率をΓ_mとする。このとき，大気の安定性は次の3つに分類される。

	絶対不安定	条件付き不安定	絶対安定
気温減率の値	$\Gamma > \Gamma_d$	$\Gamma_d > \Gamma > \Gamma_m$	$\Gamma_m > \Gamma$
乾燥した空気塊	不安定	（安定 / 不安定）	安定
飽和した空気塊	不安定	（安定 / 不安定）	安定

・**対流圏の大気の安定性**

対流圏の大気の平均的な気温減率は約 6.5K/km であり，条件付き不安定の状態にある。

気象条件によっては絶対不安定や絶対安定の状態になることもあり，積乱雲が発生しやすいのは（絶対不安定 / 絶対安定）となったときである。

まとめ

・大気の安定性は，気温減率，乾燥断熱減率，湿潤断熱減率の大小関係によって分類される。

・対流圏の大気の平均的な状態は＿＿＿＿＿＿＿＿であり，これは空気塊が乾燥していれば＿＿＿＿＿＿＿で，飽和していれば＿＿＿＿＿＿＿＿＿な状態である。

Chapter3　演習問題

ここでは，断熱変化と大気の安定性について確認しましょう。

問題(1)　乾燥断熱減率について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

ある高度にある空気塊を上空へと持ち上げたとき，気圧が低下することによって体積は（増加 / 減少）する。このとき，空気塊は（大気を押しのける / 大気によって押し縮められる）ため，その仕事によって内部エネルギーが（増加 / 減少）する。

このようにして，水蒸気に飽和していない空気塊の温度は高度変化に伴って低下していく。このときの温度の低下率を乾燥断熱減率といい，約 10K/km，すなわち約 1.0℃/100m である。

問題(2)　湿潤断熱減率について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

水蒸気に飽和した空気塊を上空へと持ち上げたとき，飽和していない空気塊と同様に温度が低下していく。このとき，水蒸気が水へと（凝華 / 凝固 / 凝結）したり，氷へと（凝華 / 凝固 / 凝結）したりするため，状態変化に伴う（顕熱 / 潜熱）が（水分子 / 空気塊）から（空気塊 / 周囲の大気）へと放出される。そのため，温度の低下率は乾燥断熱減率よりも（大きい / 小さい）。このときの温度の低下率を湿潤断熱減率という。

ここで，気温が著しく低いときには温度変化が起こっても状態変化する水蒸気の量が少ないため，温度の低下率に対する潜熱の影響も小さい。そのため，上空や冬の低温環境では，湿潤断熱減率の値が（0 / 10）K/km に近くなる。

問題⑶　大気の安定性について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。また，空欄［　**ア**　］に入る値を答えましょう。ただし，ここでは乾燥断熱減率を 10K/km，湿潤断熱減率を 5K/km とします。

　ある日の午前 9 時の A 地点では，高度 0m の気温が 21℃，上空 3000m の気温が 3℃であり，この間の空気は飽和していなかった。この間の気温減率が一定であったとすると，気温減率は［　**ア**　］K/km である。よって，このときの大気の状態は（絶対安定 / 条件付き不安定 / 絶対不安定）であった。

問題⑷　**問題⑶**の A 地点に対して，次の a ～ c の変化があったと仮定します。これらのうち，A 地点で上昇気流が発生しやすくなると考えられる変化をすべて答えましょう。

ここがPOINT

大気の状態を考えるときは，横軸に気温，縦軸に高度を取ったグラフを描くと，状況が把握しやすくなります！

a　日射により高度 0m の気温が 27℃まで上昇したが，上空 1000m 以上の気温は変化しなかった。

b　上空に寒気が流れ込んで上空 3000m の気温が－3℃まで低下したが，高度 0m から上空 2000m までの気温は変化しなかった。

c　地表付近に湿った空気が流れ込んで高度 0m から上空 1500m までの空気が飽和した状態となったが，気温は変化しなかった。

第13講　PART2　確認問題

問１　次の文章を読み，下の問いに答えよ。

水蒸気で飽和していない空気塊が上昇するときの温度の低下率を（　ア　）といい，その値は条件によらずほぼ一定で，100 m の上昇につき約（　イ　）℃である。

一方，水蒸気で飽和した空気塊が上昇するときは，温度の低下に伴って水蒸気が水や氷に状態変化する際に潜熱を放出するため，温度の低下が抑えられる。この温度の低下率を（　ウ　）といい，条件により異なるが，100 m の上昇につき約（　エ　）℃とされることが多い。

(1)　空欄ア～エに入る語句や数値の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ア：乾燥断熱減率　　イ：1.0
　　ウ：湿潤断熱減率　　エ：0.5

②　ア：乾燥断熱減率　　イ：10
　　ウ：湿潤断熱減率　　エ：5

③　ア：湿潤断熱減率　　イ：1.0
　　ウ：乾燥断熱減率　　エ：0.5

④　ア：湿潤断熱減率　　イ：10
　　ウ：乾燥断熱減率　　エ：5

問２　次の文章を読み，下の問いに答えよ。

周囲と同じ温度の空気塊を少しだけ上昇させたとき，水蒸気で飽和していない空気塊の場合は乾燥断熱減率にしたがって温度が低下する。このとき，周囲の大気の気温減率が乾燥断熱減率より（　オ　）ければ，空気塊は上昇を続けようとする。このような大気の状態を乾燥した空気塊に対して（　カ　）であるという。周囲の大気の気温減率が乾燥断熱減率より（　キ　）ければ，空気塊は元の高度に戻ろうとする。このような大気の状態を乾燥した空気塊に対して（　ク　）であるという。

⑴　空欄オ～クに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①	オ：小さ	カ：不安定	キ：大き	ク：安定
②	オ：小さ	カ：安定	キ：大き	ク：不安定
③	オ：大き	カ：不安定	キ：小さ	ク：安定
④	オ：大き	カ：安定	キ：小さ	ク：不安定

⑵　周囲の大気の気温減率が湿潤断熱減率より大きく，乾燥断熱減率より小さいときの大気の安定性はどうなるか。最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　空気塊が飽和していなければ不安定，飽和していれば安定である。

②　空気塊が飽和していなければ安定，飽和していれば不安定である。

③　空気塊が飽和していても飽和していなくても安定である。

④　空気塊が飽和していても飽和していなくても不安定である。

PART3 雲と降水

目標　雲粒，暖かい雨，冷たい雨について，それぞれ説明できる。

Chapter1　雲

遠目にはふんわりとして見える雲ですが，実は小さな水や氷の粒の集まりです。ここでは，そのような雲粒の形成過程について学びましょう。

雲を構成する粒子

・**エーロゾル**

大気中に浮遊する直径（1nm ～ 10μm / 1μm ～ 100μm / 100μm ～ 1mm）程度の微粒子を**エーロゾル**という。

固体の例……海塩粒子，土壌粒子，火山灰，風成塵，すす

液体の例……火山ガスや人為起源の排気ガスから生じた硫酸

・**過冷却**

液体の水が固体になるためには，水分子が規則的に並ぶ必要がある。この条件が満たされない場合，凝固点〔0℃〕を下回っても水が液体として存在することがある。この状態を**過冷却**という。

大気中には，過冷却の水滴が存在することがある。

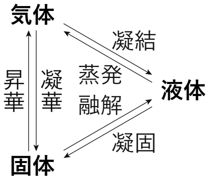
・**過飽和**

微小な水滴は表面の曲がり方が大きく，液体として不安定であり蒸発しやすい。そのため，気体のみしか存在しない環境では凝結が起こりにくく，水蒸気圧がその温度の飽和水蒸気圧を上回ることがある。この状態を**過飽和**という。

大気中の水蒸気は，エーロゾルのない環境では過飽和な状態でも安定に存在しやすい。

復習

水の状態変化（中学理科）



覚えておこう

空気中に含むことのできる水蒸気の限度量を圧力で表したものを**飽和水蒸気圧**といいます。

これは，水蒸気と水（または氷）が平らな面で接しているとき，一定時間内に境界面に飛び込む水分子と，境界面から飛び出す水分子の数が同じであるような水蒸気の圧力です。

・**雲粒**

大気中のエーロゾルは，水蒸気が状態変化してできる水滴や氷晶の核となる。水滴の核になるものを**凝結核**，氷晶の核になるものを**氷晶核**という。

水蒸気が凝結して（水滴 / 氷晶）となったり，凝華して（水滴 / 氷晶）となったりした直径（1nm ～ 10μm / 1μm ～ 100μm / 100μm ～ 1mm）程度の粒子を**雲粒**という。雲の中には，水滴と氷晶の一方または両方が含まれる。

知っておこう

雲の中の温度が 0℃を下回っていても，過冷却水として水滴（過冷却水滴）が存在することがあります。その重要性については，次の Chapter で学びます。

●雲のできかた

・**雲**

大気中に雲粒が浮かんでいるものを雲という。雲は，1cm^3 あたり（1 ～ 10 個 / 100 ～ 1000 個 / 1 万～ 10 万個）程度の雲粒によって構成されている。

・**雲の形成と発達**

ある程度水蒸気を含んだ空気塊が山の斜面に沿って上昇すると，初めは飽和していなくても，（乾燥断熱減率 / 湿潤断熱減率）にしたがって温度が低下して，やがて飽和に達する。水蒸気の凝結が起こり始めると，（乾燥断熱減率 / 湿潤断熱減率）にしたがって温度が低下するようになる。その結果として周囲の気温よりも空気塊の温度が（高く / 低く）なると，空気塊は自然と上昇を続けるようになる。このようなとき，雲は発達しやすい。

覚えておこう

飽和に達すると凝結が始まるので，その高度を凝結高度と呼びます。

まとめ

- 水蒸気圧がその温度の飽和水蒸気圧を上回っても凝結が起こっていない状態を＿＿＿＿＿という。
- 大気中の微粒子である＿＿＿＿＿＿＿を核として水蒸気が凝結または凝華してできたものを雲粒という。
- 雲の中には，水滴と氷晶の一方または両方が含まれる。

Chapter2　降水

水滴や氷の粒が大気中に浮かんでいるものが雲ですが，そのような粒はどのようにして降水になるのでしょうか。ここでは，降水過程について学びましょう。

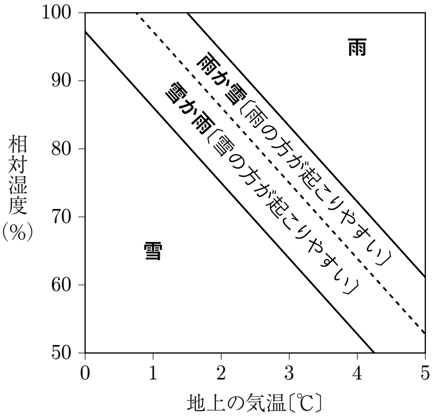
降水粒子

・降水粒子

雲粒が何らかの原因で成長すると，上昇気流によって支えられずに地表に向けて落下するようになる。これが降水であり，降水粒子の直径は（1μm ～ 100μm ／ 100μm ～ 1mm）程度である。

・雨と雪

降水粒子は，上空で氷晶であったとしても，地表付近の気温が高ければ融けて水滴となることがある。日本付近の雨の多くは，このようにして生じる。



雪は，上空の氷晶が融けずに地表付近に達したものである。

降水過程

・衝突と併合

雲中の水滴の移動速度は，その半径によって異なる。そのため，大きな水滴と小さな水滴が共存しているとき，大きな水滴は小さな水滴に衝突し，それを取り込んで成長する。

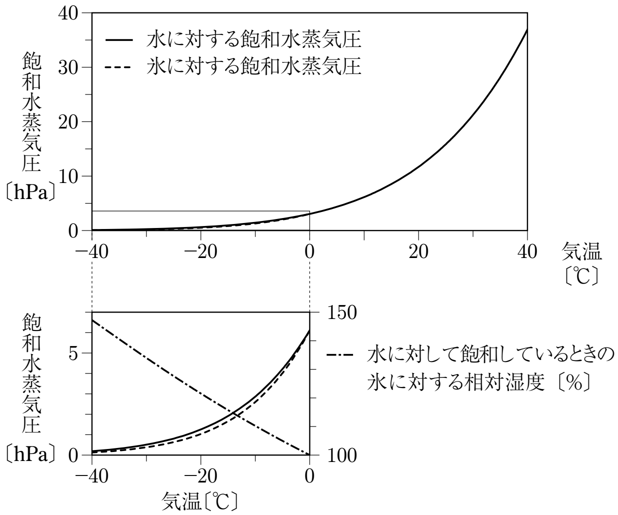
・蒸発と凝華

雲中の温度が約－40℃～ 0℃のとき，過冷却水滴が氷晶と共存する。ここで，同じ温度で比べたとき，水に対する飽和水蒸気圧は氷に対する飽和水蒸気圧よりも（大きい ／ 小さい）。そのため，水に対して（不飽和 ／ 過飽和）だが氷に対して（不飽和 / 過飽和）という状況が存在しうる。

知っておこう

気温が－40℃を下回ると，過冷却水滴が凝固しやすくなります。そのため，雲の中で過冷却水滴と氷晶が共存する温度帯は約－40℃～ 0℃だといえます。

　このとき，過冷却の水滴からは水が蒸発し，その水が氷晶に凝華する。蒸発によって生じた水蒸気が速やかに失われるので，新たな水の蒸発が起こりやすく，氷晶は急速に成長する。



・**暖かい雨**

　雲中の温度が 0℃を上回り氷晶が存在しない条件で，おもに（衝突と併合 / 蒸発と凝華）によって成長した水滴が落下した雨を**暖かい雨**という。

・**冷たい雨**

　雲中の温度が約 0℃を下回って氷晶が存在する条件で，おもに（衝突と併合 / 蒸発と凝華）によって成長した氷晶が落下し，地表付近で融けて生じた雨を**冷たい雨**という。

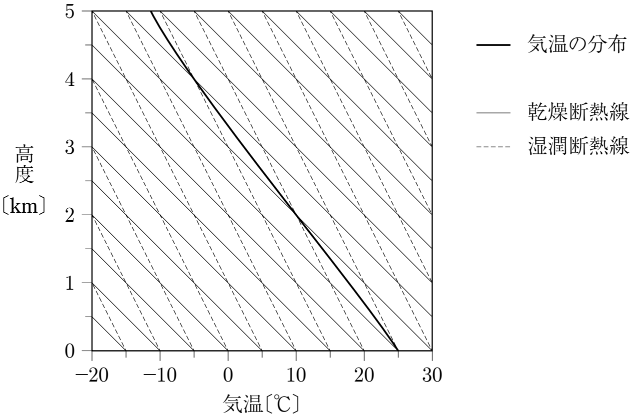
まとめ

・氷晶の存在しない雲の中で，おもに衝突と併合によって成長した水滴が落下した雨を＿＿＿＿＿＿という。
・過冷却水滴が氷晶と共存するとき，過冷却水滴から＿＿＿した水蒸気が氷晶に＿＿＿するため，氷晶は急速に成長する。
・氷晶の存在する雲の中でおもに蒸発と凝華によって成長した氷晶が落下し，融けて生じた雨を＿＿＿＿＿＿という。

Chapter3　演習問題

ここでは，大気中の水蒸気が雲を形成し，雨となるまでの過程について確認しましょう。

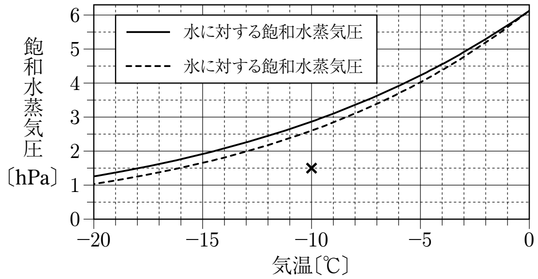
問題(1)　次の図は，A 地点の上空の気温の分布を表したものです。この図について述べた下の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。ただし，乾燥断熱線と湿潤断熱線は，それぞれ乾燥断熱減率と湿潤断熱減率にしたがう温度変化を表しています。



A 地点の地表直上にあり，周囲と同じ温度で，かつ水蒸気で飽和していない空気塊を考える。この空気塊が何らかの原因で持ち上げられ，高度 1km に達したときに飽和に達して雲を作り始めた。このときの空気塊の温度は（15℃ / 20℃）であり，周囲の気温よりも（高い / 低い)。そのため，空気塊の密度は周囲の大気の密度より（大きく / 小さく)，空気塊が自然と上昇することはない。

この空気塊がさらに持ち上げられたとすると, 高度（2km / 4km）で周囲と同じ温度になる。これよりも高い高度まで空気塊が持ち上げられると，空気塊の温度が周囲の気温よりも（高い / 低い）状態になる。このとき，空気塊の密度が周囲の大気の密度より（大きく / 小さく)，空気塊が自然と上昇するため雲は鉛直方向に発達しやすいといえる。

問題⑵　次の図は，−20℃～ 0℃における飽和水蒸気圧を表したものです。降水の形成について述べた下の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。



雲中の温度が約 0℃を下回る雲で氷晶が成長し，落下して地表付近で融けることで生じた雨を（暖かい雨 ／ 冷たい雨）という。雲の中における氷晶の成長には，過冷却水滴が重要な役割を果たしていることが多い。

氷晶と過冷却水滴が含まれている×印の状態の空気塊を考える。この空気塊を同じ圧力のまま冷却したとき，（−18℃ ／ −16℃）になると氷に対して飽和に達する。さらに冷却を続けたとき，氷に対して過飽和なので，（水蒸気の氷晶への凝華 ／ 氷晶の水蒸気への昇華）が起こりやすい。一方，（−20℃ ／ −18℃）になるまでの間は水に対して不飽和なので，（水蒸気の過冷却水滴への凝結 ／ 過冷却水滴の水蒸気への蒸発）が起こりやすい。つまり，（−16℃～−18℃ ／ −18℃～−20℃）の条件では，空気塊に元々含まれていた水蒸気だけでなく，過冷却水滴を構成していた水分子が次々と水蒸気になって氷晶を成長させると考えることができる。

第13講　PART3　確認問題

問1　次の問いに答えよ。

(1)　次の文の空欄ア，イに入る語句の組合せとして最も適当なものを，下の①～④のうちから一つ選べ。

過冷却とは，水が（　ア　）を下回っても（　イ　）として存在する状態のことである。

①　ア：凝固点　　イ：気体
②　ア：凝固点　　イ：液体
③　ア：沸点　　　イ：気体
④　ア：沸点　　　イ：液体

(2)　次の文の空欄ウ，エに入る語句の組合せとして最も適当なものを，下の①～④のうちから一つ選べ。

過飽和とは，水蒸気圧がその温度の（　ウ　）を（　エ　）いる状態のことである。

①　ウ：飽和水蒸気量　　エ：上回って
②　ウ：飽和水蒸気量　　エ：下回って
③　ウ：飽和水蒸気圧　　エ：上回って
④　ウ：飽和水蒸気圧　　エ：下回って

問2　雲を構成する粒子について，次のA～Dの説明にあてはまるものの組合せとして最も適当なものを，下の①～④のうちから一つ選べ。

A　水蒸気が水滴や氷晶となった直径1μm～100μm程度の粒子
B　大気中に浮遊する直径1nm～10μm程度の微粒子
C　水蒸気が状態変化してできる水滴の核になるもの
D　水蒸気が状態変化してできる氷晶の核になるもの

① A：雲粒　B：エーロゾル　C：氷晶核　D：凝結核
② A：雲粒　B：エーロゾル　C：凝結核　D：氷晶核
③ A：エーロゾル　B：雲粒　C：凝結核　D：氷晶核
④ A：エーロゾル　B：雲粒　C：氷晶核　D：凝結核

問３　次の文章を読み，下の問いに答えよ。

a過冷却水滴が氷晶と共存するとき，（　オ　）に対しては不飽和だが，（　カ　）に対しては過飽和であるという状況が起こりうる。このとき，過冷却水滴は蒸発して水蒸気となり，その水蒸気は凝華して氷晶を成長させる。このような過程で成長した氷晶が落下し，地表付近で融けて生じた雨を（　キ　）という。

(1)　下線部ａについて，このときの温度帯として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① −60℃～−40℃　② −40℃～ 0℃
③ 0℃～ 10℃　④ 10℃～ 30℃

(2)　空欄オ～キに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① オ：氷　カ：水　キ：暖かい雨
② オ：氷　カ：水　キ：冷たい雨
③ オ：水　カ：氷　キ：暖かい雨
④ オ：水　カ：氷　キ：冷たい雨

PART4 フェーン現象

目標　フェーン現象とは何か，その原理と空気塊の性質の変化について説明できる。

Chapter1　フェーン現象

　空気塊から降水が起こると，空気塊の性質が変化します。ここでは，その典型的な例であるフェーン現象について学びましょう。

フェーン現象

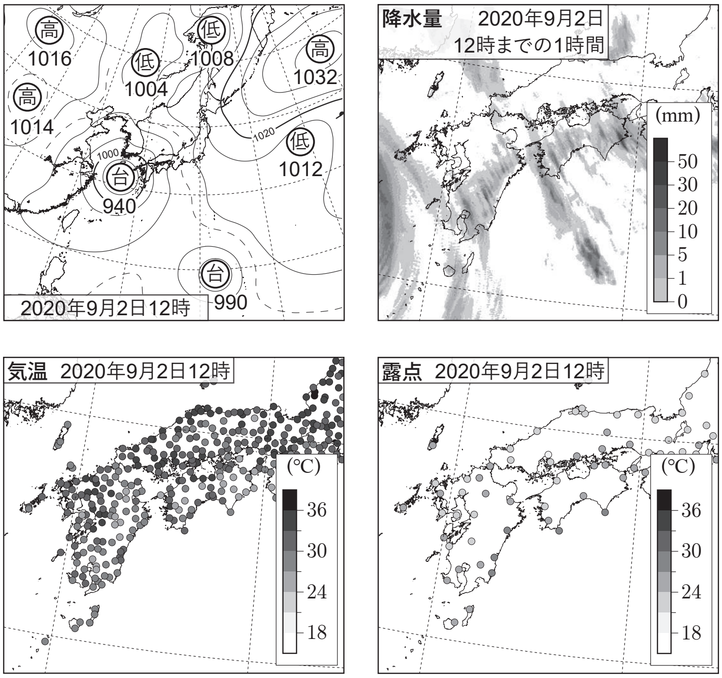
・フェーンとフェーン現象

　水蒸気を含む空気塊が山を越えて吹き下りるとき，風下側で吹く乾燥した高温の風を**フェーン**という。また，それによって風下側の気温が上昇することを**フェーン現象**という。

知っておこう

フェーン (Föhn) は，元々アルプス山脈を越えて吹き下りる風を指す言葉でした。現在では，世界各地の山越え気流に対してフェーンという用語が用いられています。

・フェーン現象の例



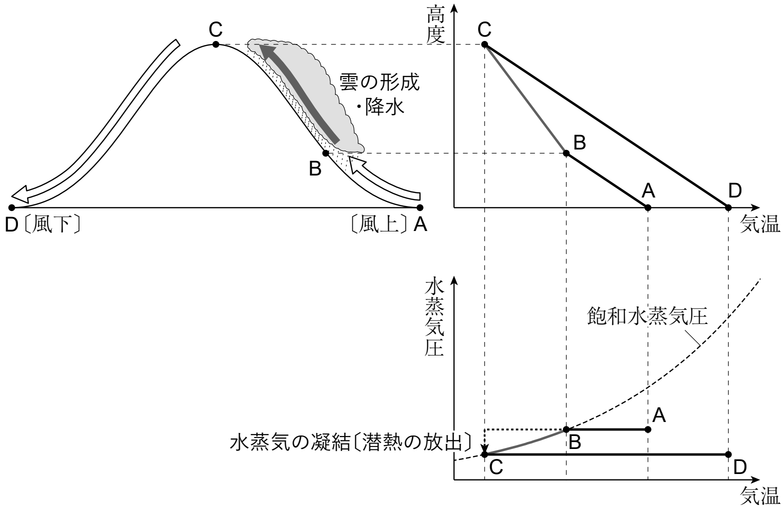
（データは気象庁による）

→台風に吹き込む（北西 / 南東）の風がフェーン現象を引き起こし，太平洋側より日本海側の方が高温となっている。

知っておこう

フェーン現象は風下側の異常高温の一因であり，人間だけでなく鶏などの家畜にも健康被害をもたらすことがあります。また，フェーンは乾燥した高温の風なので，火災の拡大につながることがあるほか，収穫前の若い稲穂が急激な乾燥によって枯れる原因となります。

・フェーン現象の原理



知っておこう

左の図は，高度変化（気圧変化）にともなう水蒸気圧の変化を無視して模式的に表したものです。演習問題では，より現実的な水蒸気圧の変化を扱います。

	空気塊の状態	温度変化
A → B	（飽和 ／ 不飽和）	（乾燥 ／ 湿潤）断熱減率
B → C	（飽和 ／ 不飽和）	（乾燥 ／ 湿潤）断熱減率
C → D	（飽和 ／ 不飽和）	（乾燥 ／ 湿潤）断熱減率

B → C で水蒸気が凝結し，潜熱を放出する

→降水で空気塊の水蒸気が減少する…風下における乾燥の原因

→潜熱が空気塊を加熱する……………風下における高温の原因

覚えておこう

上のグラフからは，雲の形成されている高度帯で風上側の温度低下率より風下側の温度上昇率が大きいことが，風下側の高温の原因だと読み取れます。

ただし，その温度変化率の違いは，水蒸気が凝結するときに潜熱が放出されるため生じるものです。つまり，元をたどれば水蒸気の凝結と潜熱の放出がフェーン現象の原因だといえるのです。

まとめ

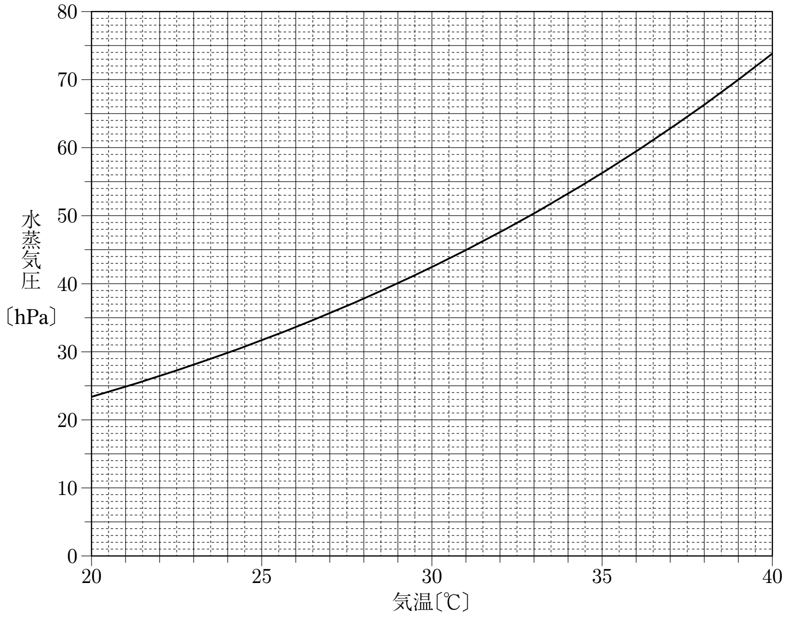
・水蒸気を含む空気塊が山を越えて吹き下りるとき，風下側で気温が上昇することを＿＿＿＿＿＿＿＿という。

・この現象が起こるとき，風上側で雲が形成されて降水が生じることにより水蒸気が減少するため，風下側の風は風上側より乾燥する。

・さらに，雲が形成されるときは空気塊へと＿＿＿＿が放出されるため，風下側の風は風上側より高温となる。

Chapter2　演習問題

ここでは，具体的な計算を通してフェーン現象についての理解を深めましょう。必要に応じて，次の飽和水蒸気圧曲線を用いてください。



問題(1)　風上側の標高 0m における空気塊について述べた次の文章中の［　**ア**　］・［　**イ**　］に入る値を答えましょう。

気温は 31.2℃，露点は 27.2℃であった。この空気塊の飽和水蒸気圧は［　**ア**　］hPa，水蒸気圧は［　**イ**　］hPa である。

問題(2)　**問題(1)**の状態の空気塊について述べた次の文章中の空欄［　**ウ**　］に入る値を答えましょう。

ある空気塊が水蒸気の状態変化を伴わずに移動するとき，空気塊に占める水蒸気の割合は変化しない。つまり，気圧が変化すると，それに比例して水蒸気圧も変化すると考えることができる。

標高 0m の気圧が 1000hPa，高度 1500m の気圧が 850hPa のとき，**問題(1)**の空気塊が水蒸気の状態変化を

ここがPOINT

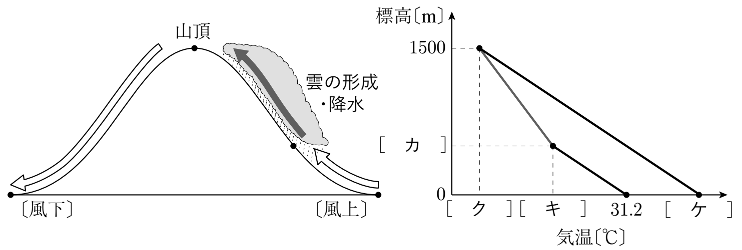
「気圧と水蒸気圧が比例する」ということは，「気圧が t 倍になれば水蒸気圧も t 倍になる」ということです。

伴わずに高度 1500m まで持ち上げられると，水蒸気圧は［　**ウ**　］hPa となる。

問題⑶　問題⑵の結果について述べた次の文章中の空欄［　**エ**　］・［　**オ**　］に入る値を答えましょう。ただし，［　**エ**　］の温度は 0.5℃刻みでグラフから読み取ってください。

水蒸気圧が［　**ウ**　］hPa の空気塊は露点が［　**エ**　］℃である。この温度は標高 0m の露点より低く，平均［　**オ**　］℃ /km で露点が低下していることがわかる。

問題⑷　問題⑴の状態の空気塊が風によって山の斜面に沿って上昇し，飽和に達したところから雲を作って雨を降らせながら標高 1500m の山頂に達しました。さらに，そこで雲が消え，空気塊は山の反対側の標高 0m まで吹き下りました。このようすを示した次の図中の空欄［　**カ**　］～［　**ケ**　］に入る値を下の文章を参考にして答えましょう。ただし，乾燥断熱減率を 9.8K/km，湿潤断熱減率を 3.8K/km とします。



標高 0m における気温は 31.2℃，露点は 27.2℃である。飽和していない空気塊を持ち上げると，気温は 9.8℃ /km，露点は［　**オ**　］℃ /km の割合で低下していく。よって，それらが一致する標高，すなわち凝結高度を x とすると，

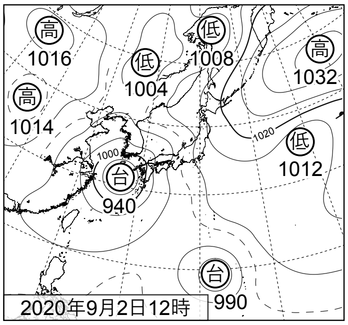
31.2℃－9.8℃/km × x ＝ 27.2℃－［　**オ**　］℃/km × x

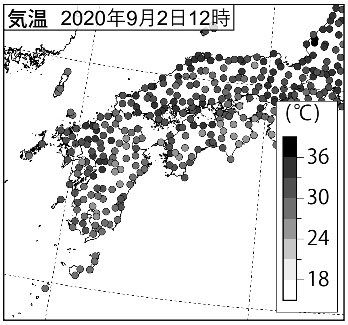
である。この方程式を解き，凝結高度は［　**カ**　］m であることがわかる。

第13講　PART4　確認問題

問1　次の文章を読み，下の問いに答えよ。

図は，日本でフェーン現象が起こったときの天気図と気温分布図である。水蒸気を含む空気塊が山を越えて吹き下ろすとき，(　ア　) 側で a乾燥した高温の風が吹き，気温が上昇する。図では，(　イ　) 側が高温となっている。





(データは気象庁による)

(1)　下線部 a の風のことを何というか。最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

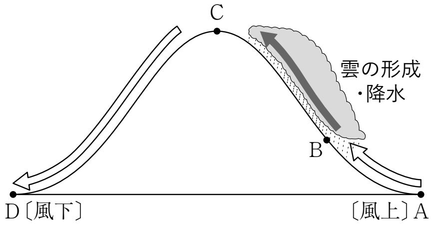
①　モンスーン　　②　貿易風
③　偏西風　　④　フェーン

(2)　空欄ア，イに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ア：風上　　イ：日本海
②　ア：風上　　イ：太平洋
③　ア：風下　　イ：日本海
④　ア：風下　　イ：太平洋

問2 次の文章を読み，下の問いに答えよ。

風上側から空気塊が山を越えて吹き下ろす状況を考える。AからBの間は（　ウ　）な空気塊で，（　エ　）断熱減率に従い温度が低下する。BからCの間では（　オ　）状態となり，（　カ　）断熱減率に従い温度が低下する。この間では雲が形成されて降水が生じることで水蒸気が（　キ　）し，さらに水蒸気が凝結して空気塊に潜熱を（　ク　）する。従って，風上よりも乾燥した高温の空気塊がCからDの間を移動することになる。



(1) 空欄ウ～カに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① ウ：飽和　エ：乾燥　オ：飽和　カ：湿潤
② ウ：飽和　エ：湿潤　オ：不飽和　カ：乾燥
③ ウ：不飽和　エ：乾燥　オ：飽和　カ：湿潤
④ ウ：不飽和　エ：湿潤　オ：不飽和　カ：乾燥

(2) 空欄キ，クに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① キ：減少　ク：吸収
② キ：減少　ク：放出
③ キ：増加　ク：吸収
④ キ：増加　ク：放出

第 14 講　大気の運動
PART1 地上天気図と等圧面天気図

目標　等圧面天気図から気圧の谷の位置を読み取ることができる。

Chapter1　地上天気図と等圧面天気図

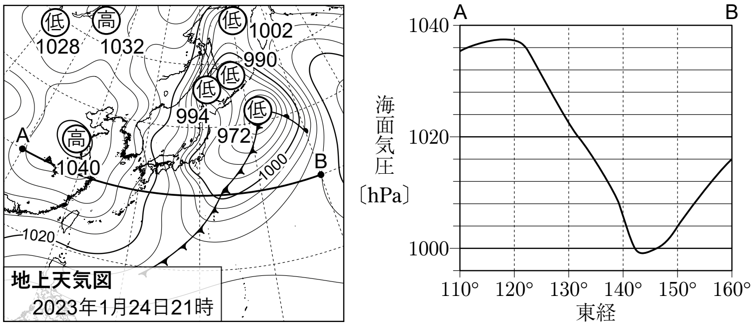
気象現象を考える上では，地表付近だけでなく上空の大気の状態も重要になってきます。ここでは，上空の気圧の分布を示す等圧面天気図の読み取り方について学びましょう。

地上天気図

・地上天気図とは

海面〔標高 0m〕における気圧の分布を等圧線によって示した天気図を**地上天気図**という。高気圧，低気圧の位置や，前線の位置と種類も描かれる。

・地上天気図の例



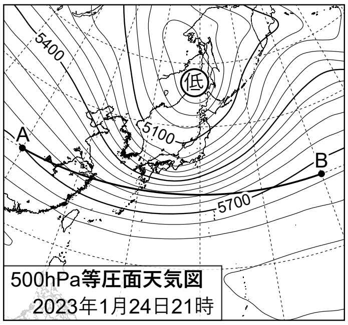
（データは気象庁による）

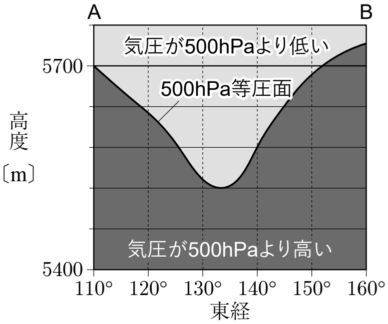
等圧面天気図

・等圧面天気図とは

上空における気圧の分布を等圧面の高度によって示した天気図を**等圧面天気図**という。高気圧，低気圧の位置が描かれるほか，等温線も重ねて描かれることがある。

・**等圧面天気図の例**





（データは気象庁による）

→等圧面の高度が小さいところは，同じ高度で見たときに気圧の低いところにあたる。

・**気圧の尾根と気圧の谷**

上空の等圧面の等高度線が南北に波打っているとき，等圧面の高度が大きい部分の連なりを**気圧の尾根**，等圧面の高度が小さい部分の連なりを**気圧の谷**という。

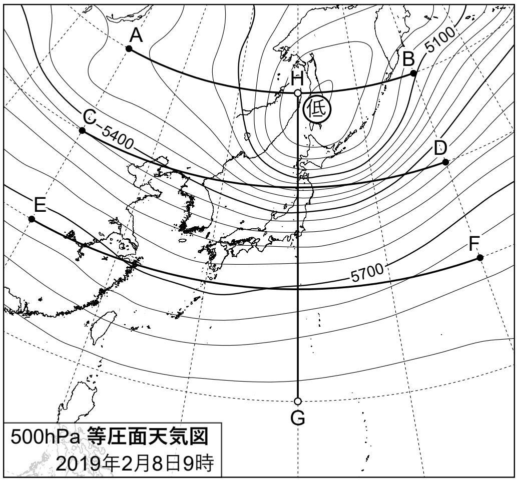
上空の等圧面の高度はふつう低緯度側より高緯度側の方が（高い ／ 低い）ので，気圧の谷は等高度線が（低緯度側 ／ 高緯度側）に凸となっている部分に対応する。

まとめ

- 標高 0m における気圧の分布を＿＿＿＿によって示した天気図を地上天気図という。
- 上空における気圧の分布を等圧面の高度によって示した天気図を等圧面天気図という。
- 北半球において，等圧面の等高度線が南側に凸となっている部分は気圧の＿＿＿である。

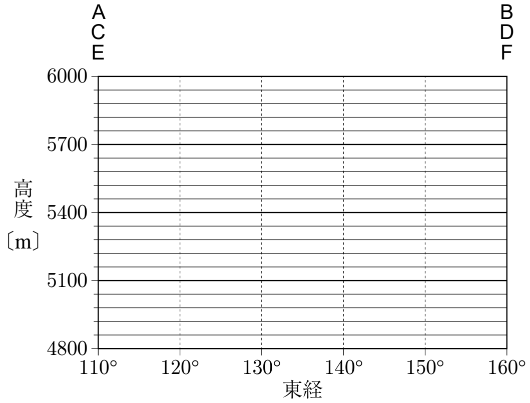
Chapter2　演習問題

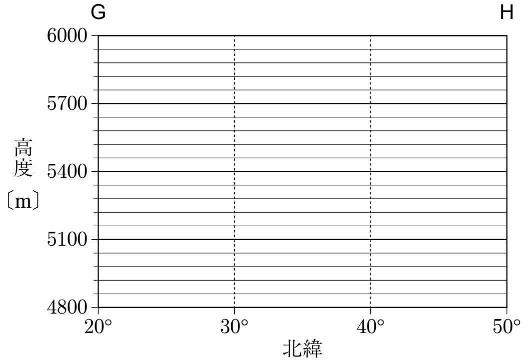
次の図は，ある日の 500hPa 等圧面天気図です。ここでは，この図を用いて等圧面天気図の読み取りの練習をしましょう。



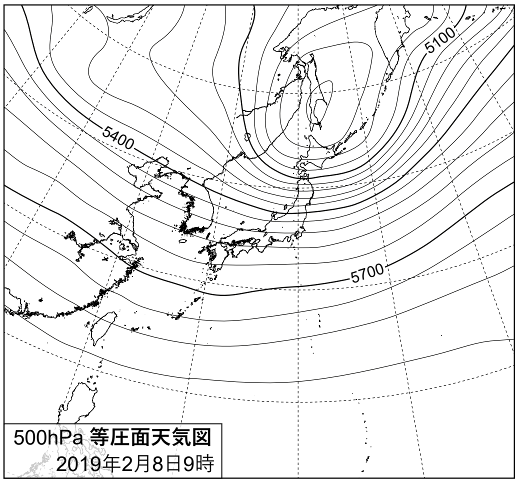
（データは気象庁による）

問題(1)　上の図の A−B，C−D，E−F，G−H における等圧面高度を，次の断面図上に描きましょう。





問題⑵　問題⑴の結果を参考にして，次の図中に 500hPa 等圧面における日本列島上空の気圧の谷を滑らかな曲線で描きましょう。



（データは気象庁による）

問題⑶　気圧の谷について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

　気圧は自分より上にある大気の重さによる圧力である。よって，同じ等圧面より上にある大気の重さは場所によらず等しい。このことから，2 枚の等圧面の間にある大気の質量も，場所によらず等しいと考えることができる。

　同じ質量の空気の密度は温度が低いほど（大きく ／ 小さく），たとえば 1000hPa 等圧面と 500hPa 等圧面の間にある空気柱は，低緯度地域より高緯度地域の方が（背が高い ／ 背が低い）。よって，中緯度地域の上空では，低緯度側とくらべて高緯度側の方が等圧面の高度が（高い ／ 低い）。

　したがって，上空の等圧面の等高度線が南北に波打っているとき，気圧の谷は等高度線が（高緯度側 ／ 低緯度側）に凸になっている部分に対応するといえる。

第14講 PART1　確認問題

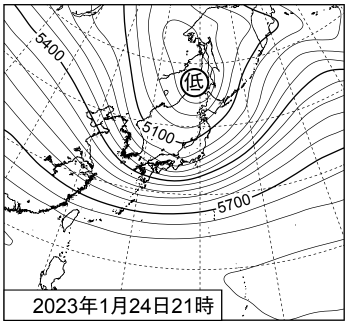
問１　次の文章を読み，下の問いに答えよ。

海面（標高０m）における気圧の分布を等圧線によって示した天気図を（　ア　）という。

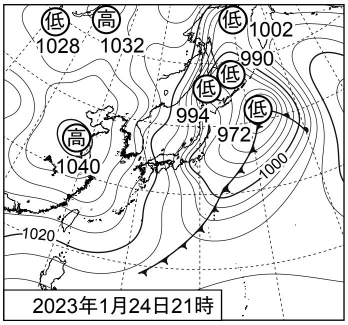
上空における気圧の分布を等圧面の高度によって示した天気図を（　イ　）という。

ある地点の上空では高度が低いほど気圧が（　ウ　）なるので，等圧面の高度の低いところは周囲より（　エ　）になっている。等圧面の等高度線が南北に波打った形になっているとき北半球では，低緯度側に凸になっている部分を気圧の（　オ　）といい，高緯度側に凸になっている部分を気圧の（　カ　）という。

図ａ



図ｂ



（データは気象庁による）

(1)　空欄ア，イに入る語句，および対応する図ａ，ｂの組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ア：地上天気図，ａ　　イ：等圧面天気図，ｂ

②　ア：地上天気図，ｂ　　イ：等圧面天気図，ａ

③　ア：等圧面天気図，ａ　イ：地上天気図，ｂ

④　ア：等圧面天気図，ｂ　イ：地上天気図，ａ

(2)　空欄ウ～カに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

	ウ	エ	オ	カ
①	ウ：高く	エ：低圧	オ：谷	カ：尾根
②	ウ：高く	エ：低圧	オ：尾根	カ：谷
③	ウ：低く	エ：高圧	オ：谷	カ：尾根
④	ウ：低く	エ：高圧	オ：尾根	カ：谷

PART2 空気塊にはたらく力

目標 空気塊にはたらく 4 つの力を挙げ，それぞれの性質を説明できる。

Chapter1　気圧傾度力

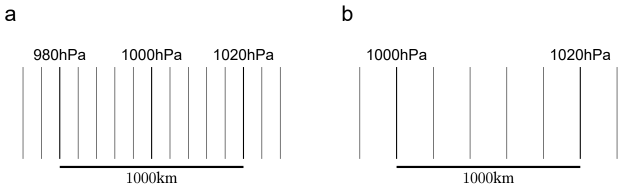
空気塊の運動を考えるとき，空気塊にはたらく力を知ることは大切です。まず，つねに考慮すべき力として気圧傾度力について学びましょう。

知っておこう
ここでは風の吹き方を考えるため，水平方向にはたらく力に着目します。鉛直方向にはたらく力としては重力があります。

気圧傾度力

・**気圧傾度**

単位距離あたりの気圧差を**気圧傾度**という。



a の等圧線の間隔は 100km で，気圧傾度は

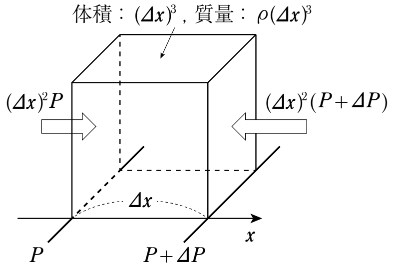
$$\frac{1020\text{hPa}-980\text{hPa}}{1000\text{km}}=0.04\text{hPa/km}$$

b の等圧線の間隔は 200km で，気圧傾度は

$$\frac{1020\text{hPa}-1000\text{hPa}}{1000\text{km}}=0.02\text{hPa/km}$$

→気圧傾度は等圧線の間隔に（比例 / 反比例）する。

・気圧傾度力



空気の密度をρとして，一辺の長さがΔx の立方体の向かい合う 2 面の圧力がΔP だけ異なるとする。図の x 軸方向の加速度を a_Gとおくと，x 軸方向の運動方程式は

$$\rho(\Delta x)^3 \cdot a_G = (\Delta x)^2 P - (\Delta x)^2 (P + \Delta P)$$

と表せる。よって，

$$a_G = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta x}$$

であり，この加速度を生じる力を**気圧傾度力**という。

単位質量の空気塊にはたらく気圧傾度力の大きさは気圧傾度に（比例 / 反比例）する。また，気圧傾度力は等圧線と直交して高圧側から低圧側に向かってはたらく。

復習

運動方程式（物理基礎）
質量 m の物体に力 F を加えたときの加速度を a とすると

$$ma = F$$

が成り立ち，これを**運動方程式**という。運動方程式は

$$a = \frac{F}{m}$$

と表せるので，加速度は単位質量の物体にはたらく力だといえる。

まとめ

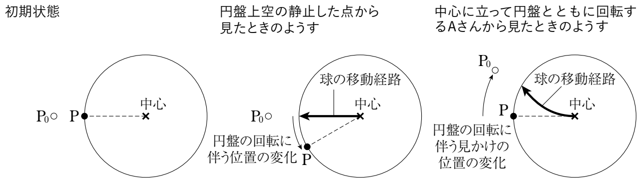
・＿＿＿＿＿あたりの気圧差を気圧傾度といい，それによる力を＿＿＿＿＿という。
・その力の大きさは気圧傾度に＿＿＿し，等圧線と直交して＿＿＿＿側から＿＿＿＿側に向かってはたらく。

Chapter2　転向力

私たちは，空気塊の運動を自転する地表面から見たときの運動として表現します。ここでは，地球の自転によって生じる見かけの力である転向力について学びましょう。なお，Chapter2，Chapter3の式の導出過程は物理の内容を含んでやや難しいので，大まかな流れをつかむだけでもかまいません。ただし，結果はしっかりと覚えておきましょう。

転向力

・回転する円盤上における物体の運動



反時計回りに回転する円盤を考える。中心に立っているAさんが円盤の外の点P_0に向かって球を投げる。このとき，球は中心とP_0とを結ぶ線分上の点Pを通ることが予想される。

球の経路を円盤上空の静止した点から見たとき

球は中心からP_0に向かって直進〔等速直線運動〕する。

球の経路を円盤とともに回転するAさんから見たとき

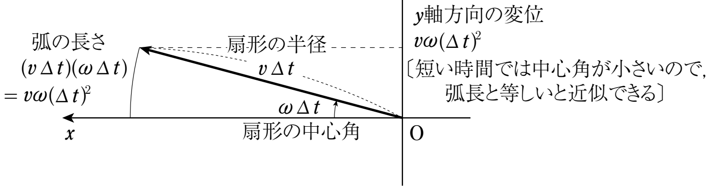
はじめP_0とPは重なって見えるが，円盤の回転に伴ってP_0はPの右側に見えるようになる。球も同様にPの右側にずれていき，球が円盤の縁に到達したとき，球はPの右側にある。

知っておこう

ここでの角速度の単位はrad/s〔ラジアン毎秒〕を用います。角度が弧度法（☞数学Ⅱ）で表されていることに注意してください。

・回転する円盤上の物体にはたらく転向力

速さをv，微小な経過時間をΔtとすると，移動距離は$v\Delta t$である。円盤の角速度をωとすると回転角は$\omega\Delta t$であり，y軸方向の変位は$(v\Delta t)(\omega\Delta t) = v\omega(\Delta t)^2$と近似できる。



復習

扇形の弧長（数学Ⅱ）

中心角θを弧度法で表したとき，半径rの扇形の弧の長さlは

$$l = r\theta$$

と表せる。

図の y 軸方向の加速度を a_C として等加速度直線運動の公式を用いると，y 軸方向の初速が 0 であることから

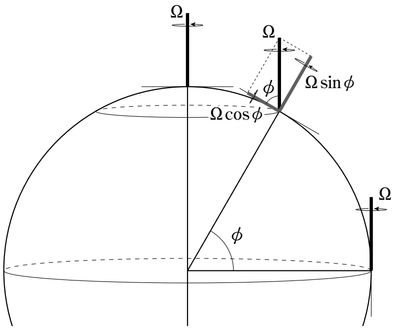
$$\frac{1}{2}a_C(\Delta t)^2 = v\omega(\Delta t)^2$$
$$a_C = 2v\omega \quad \cdots\cdots(*)$$

が得られる。この加速度を生じる見かけの力を**転向力**という。

単位質量の物体にはたらく転向力の大きさは運動の速さと角速度に比例する。また，反時計回りに回転する円盤上において，転向力は物体の進行方向から直角（右 / 左）向きにはたらく。

知っておこう
物体が想定よりも右にあるのは，右向きに何らかの力がはたらいたからだと考えます。実際には観察者のいる円盤が回転したのであって力がはたらいたわけではないので，この力は見かけの力と呼ばれています。

・**地球上の物体にはたらく転向力**



知っておこう
赤道でも地表面は回転していますが，その回転の軸は水平面と平行です。回転する円盤の例でいえば円盤の直径を軸としたような回転をしていて，円盤と垂直な軸のまわりの回転はしていないのです。

図のように考えると，(*) の角速度 ω，すなわち地表面と垂直な軸のまわりの回転角速度は，地球の自転角速度 Ω と緯度 ϕ を用いて $\omega = \Omega\sin\phi$ と表せる。これを (*) に代入すると，

$$a_C = 2v\Omega\sin\phi$$

が得られる。

すなわち，単位質量の空気塊にはたらく転向力の大きさは水平面上での風速と緯度の正弦〔sin〕との積に比例する。また，自転が反時計回りの（北半球 / 南半球）において，転向力は空気塊の進行方向から直角（右 / 左）向きにはたらく。

覚えておこう
転向力の向きは，回転の向きによって変化します。自転の向きが北半球とは逆向きになる南半球では，転向力のはたらく向きも北半球とは逆向きになるのです。

まとめ
・自転する地球上で観察したとき，運動する空気塊の進行方向を変えるようにはたらいて見える力を＿＿＿＿という。
・その力の大きさは風速と緯度の＿＿＿との積に比例し，北半球では空気塊の進行方向から直角＿＿向きにはたらく。

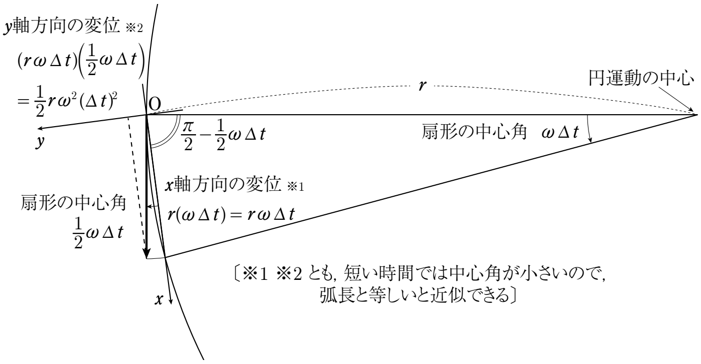
Chapter3　遠心力と摩擦力

空気塊の運動を考えるとき，条件によっては遠心力や摩擦力も重要になってきます。ここでは，これらの力について学びましょう。

遠心力

・等速円運動と遠心力

ある点を中心として速さ v で等速円運動する質量 m の空気塊について考える。慣性の法則により，この空気塊は速さ v で直進しようとしている。円運動している空気塊からは，円の外側に向けられようとしているように見える。



円運動の半径を r，角速度を ω とする。微小な経過時間を Δt とすると，回転角は $\omega\Delta t$，x 軸方向の変位は $r\omega\Delta t$ である。このとき，y 軸方向の変位は $\frac{1}{2}r\omega^2(\Delta t)^2$ と近似できる。

図の y 軸方向の加速度を a_F として等加速度直線運動の公式を用いると，y 軸方向の初速が 0 であることから

$$\frac{1}{2}a_F(\Delta t)^2=\frac{1}{2}r\omega^2(\Delta t)^2$$

$$a_F=r\omega^2 \qquad \cdots\cdots(**)$$

が得られる。この加速度を生じる見かけの力を**遠心力**という。

ここで，空気塊の速さを用いると空気塊の移動距離は $v\Delta t$ と表せる。よって，$r\omega\Delta t=v\Delta t$ より $\omega=\frac{v}{r}$ が成り立ち，(＊＊) は

$$a_F=r\left(\frac{v}{r}\right)^2$$

$$=\frac{v^2}{r}$$

と表せる。

すなわち，単位質量の空気塊にはたらく遠心力の大きさは(風速 / 風速の 2 乗)に(比例 / 反比例)し,円運動の半径に(比例 / 反比例）する。また，遠心力は円運動の中心と反対方向にはたらく。

摩擦力

・**空気塊の受ける摩擦力**

地表付近では，風の流れが乱される。このことによる加速度を a_D とおくと，風速が v のとき

$$a_D = -kv$$

と表せて〔k は条件によって異なる正の定数〕，この加速度を生じる力を**摩擦力**という。

単位質量の空気塊にはたらく摩擦力の大きさは風速に比例し，進行方向と（同じ / 逆の / 直交する）向きにはたらく。また，比例定数 k は海上とくらべて陸上の方が（大きい / 小さい）。

知っておこう

左の力には摩擦力という名前がついていますが，物理で学ぶ摩擦力の式と違うことに戸惑った人もいるかもしれません。空気塊にはたらく摩擦力は風の流れの乱れによる力であり，固体どうしが接触している面ではたらく摩擦力とは異なる性質をもっているのです。

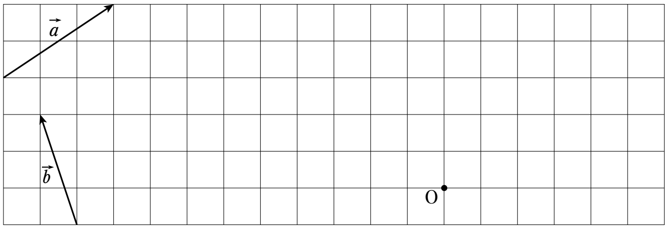
まとめ

・空気塊が円運動するとき，円運動の中心と逆向きにはたらいて見える力を＿＿＿＿＿という。
・その力の大きさは＿＿＿＿＿＿＿に比例して，円運動の半径に反比例する。
・空気塊が地表付近を進むとき，風の流れが乱されることで進行方向と逆向きにはたらく力を＿＿＿＿＿という。
・その力の大きさは風速に比例して，同じ風速であれば海上とくらべて陸上の方が＿＿＿＿＿。

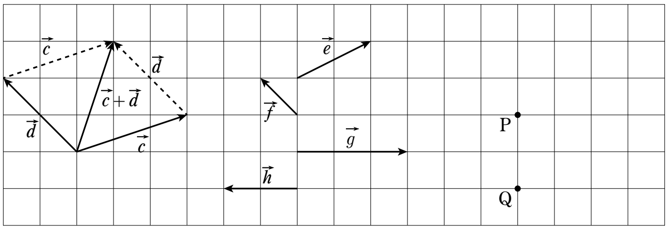
Chapter4　演習問題

　ここでは，さまざまな風について考えるための準備として，力の合成や分解の練習をしましょう。

問題(1)　向きと大きさという 2 つの情報をもった数をベクトルといいます。ベクトルは矢印を用いて表すことができますが，位置の情報をもたないので，向きと大きさが同じであればどこにあっても同じベクトルだといえます。次の図の $\vec{a}$ と $\vec{b}$ を，それぞれ点 O を始点とするように描きましょう。



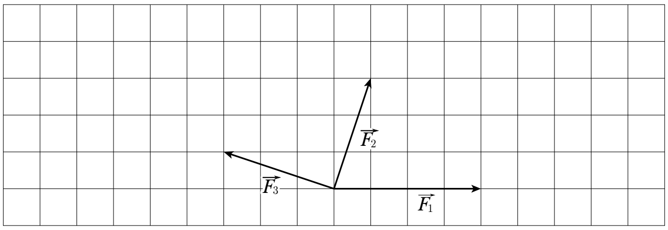
問題(2)　ベクトルどうしの和は，一方のベクトルの終点にもう一方のベクトルをつなげて描くことで求められます。たとえば，次の図のようにして $\vec{c}+\vec{d}$ を図示することができます。この例を参考に，点 P を始点として $\vec{e}+\vec{f}$ を，点 Q を始点として $\vec{g}+\vec{h}$ を，それぞれ描きましょう。



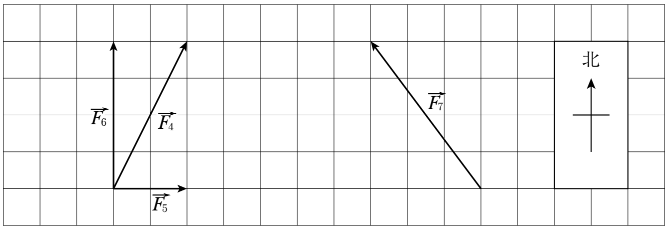
問題(3) 力は向きと大きさをもっているので，ベクトルだといえます。複数の力を表すベクトルの和を考えることを，力の合成といいます。次の図に示された 3 つの力 $\vec{F_1}$, $\vec{F_2}$, $\vec{F_3}$ を合成し，これらのベクトルと同じ点を始点として描きましょう。ただし，3 つのベクトルの和は，2 つのベクトルの和にもう 1 つのベクトルを加えることで求められます。

知ってこう

合成して得られる力を合力（ごうりょく）といいます。



問題(4) 空気塊にはたらく力を考えるとき，東西方向と南北方向のような，直交する 2 方向に分けて考えたいことがあります。たとえば，図の $\vec{F_4}$ は，東西方向の $\vec{F_5}$ と南北方向の $\vec{F_6}$ を用いて $\vec{F_4}=\vec{F_5}+\vec{F_6}$ と表せます。このように，力を表すベクトルを複数のベクトルの和で表すことを力の分解といいます。次の図に示された $\vec{F_7}$ を，東西方向と南北方向の 2 つのベクトルに分解し，ともに $\vec{F_7}$ と同じ点を始点として描きましょう。



第 14 講　PART2　確認問題

問１　次のア～エは，空気塊にはたらく４つの力を説明したものである。ア～エが表す力の組合せとして最も適当なものを，下の①～④のうちから一つ選べ。

ア　自転する地球上で観察したとき，運動する空気塊の進行方向を変えるようにはたらいて見える力
イ　空気塊が円運動するとき，円運動の中心と逆向きにはたらいて見える力
ウ　単位距離あたりの気圧差による力
エ　空気塊が地表付近を進むとき，風の流れが乱されることで進行方向と逆向きにはたらく力

①　ア：転向力　　イ：気圧傾度力
　　ウ：摩擦力　　エ：遠心力
②　ア：転向力　　イ：遠心力
　　ウ：気圧傾度力　　エ：摩擦力
③　ア：摩擦力　　イ：転向力
　　ウ：気圧傾度力　　エ：遠心力
④　ア：気圧傾度力　　イ：遠心力
　　ウ：転向力　　エ：摩擦力

問２　次の問いに答えよ。

(1)　気圧傾度力の向きについての記述として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。
①　等圧線と直交して高圧側から低圧側の向きにはたらく。
②　等圧線と直交して低圧側から高圧側の向きにはたらく。
③　等圧線の接線方向にはたらく。
④　鉛直方向にはたらく。

(2) 地球の自転角速度をΩとする。緯度ϕの位置で速さvで動く空気塊の単位質量あたりにはたらく転向力の大きさについての記述として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① $\Omega\cos\phi$に比例する。

② $\Omega\cos\phi$に反比例する。

③ $\Omega\sin\phi$に比例する。

④ $\Omega\sin\phi$に反比例する。

(3) 半径r，速さvの等速円運動をする空気塊の単位質量あたりにはたらく遠心力の大きさを表す式として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① rv　　② rv^2

③ $\dfrac{v}{r}$　　④ $\dfrac{v^2}{r}$

(4) 単位質量の空気塊にはたらく摩擦力についての記述として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① 大きさは風速に比例し，比例定数は海上より陸上の方が大きい。

② 大きさは風速に比例し，比例定数は海上より陸上の方が小さい。

③ 大きさは風速に反比例し，比例定数は海上より陸上の方が大きい。

④ 大きさは風速に反比例し，比例定数は海上より陸上の方が小さい。

PART3 地衡風

目標 天気図から地衡風の吹き方を読み取ることができる。

Chapter1 地衡風

上空を吹く風の大まかなようすは，天気図から読み取れます。ここでは，風の吹き方をどのように考えればよいかを学びましょう。

地衡風

・空気塊にはたらく力のつり合い

質量 m の空気塊に気圧傾度力 $\vec{F_G}$ ，転向力 $\vec{F_C}$，遠心力 $\vec{F_F}$，摩擦力 $\vec{F_D}$ がはたらいて加速度 $\vec{a}$ が生じるとすると，運動方程式は

$$m\vec{a}=\vec{F_G}+\vec{F_C}+\vec{F_F}+\vec{F_D}$$

と表せる。

速度を変化させずに安定して吹いている風を考えるとき，空気塊には加速度が生じていない，すなわち $\vec{a}=\vec{0}$ だといえて，このとき

$$\vec{F_G}+\vec{F_C}+\vec{F_F}+\vec{F_D}=\vec{0}$$

が成り立つ。つまり，空気塊にはたらく力がつり合っている。

・地衡風とは

高度約 1km 以上の上空で，等圧線が直線状になっているときについて考える。このとき，摩擦力と遠心力の大きさは非常に小さいので無視することができて，気圧傾度力と転向力がつり合っているとみなすことができる。このような状態で吹く風を**地衡風**という。

気圧傾度力	気圧傾度による力	高圧側→低圧側
転向力	地球の自転による見かけの力	進行方向から直角右向き
遠心力	回転運動による見かけの力	中心と逆向き
摩擦力	地表により風が乱されて生じる力	進行方向と逆向き

知っておこう

力に向きと大きさがあるのと同様に，速度や加速度にも向きと大きさがあります。つまり，速度や加速度も力と同様にベクトルだといえます。

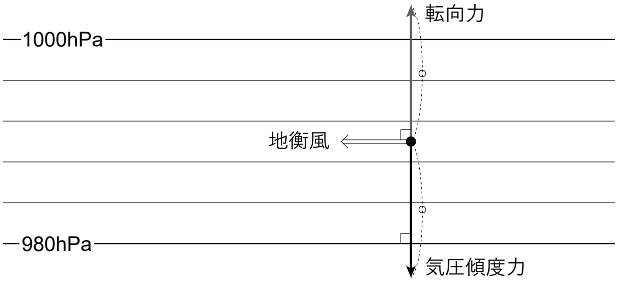
ただし，単に「力」といったときに（向きを考えない）「力の大きさ」を指すこともあるので，文脈に注意しましょう。

知っておこう

大きさが 0 であるベクトルを $\vec{0}$ と表します。ベクトルどうしの和はベクトルなので，0 とは表せないのです。

・地衡風の吹き方

気圧傾度力は等圧線と直交して高圧側から低圧側に向かってはたらき，北半球において転向力は空気塊の進行方向から直角右向きにはたらくので，地衡風は等圧線と平行に吹く。



地衡風について，単位質量の空気塊にはたらく気圧傾度力の大きさ $|a_G|$ と転向力の大きさ $|a_C|$ が等しいことから

$$|a_G| = |a_C|$$

$$\left|-\frac{1}{\rho}\cdot\frac{\Delta P}{\Delta x}\right| = |2v\Omega\sin\phi|$$

$$v = \frac{1}{2\rho\Omega\sin\phi}\cdot\left|\frac{\Delta P}{\Delta x}\right|$$

と表せる〔ただし，v は風速，ρ は空気の密度，Ω は地球の自転角速度，ϕ は緯度，$\frac{\Delta P}{\Delta x}$ は気圧傾度〕。つまり，ある緯度における地衡風の風速は気圧傾度の大きさに（比例 / 反比例）する。

知っておこう

赤道付近では $\sin\phi$ が 0 に近いため，単位質量の空気塊にはたらく転向力の大きさ $|a_C|$ も 0 に近づきます。このとき転向力は気圧傾度力とつり合うことができないため，赤道付近で地衡風が吹くことはありません。

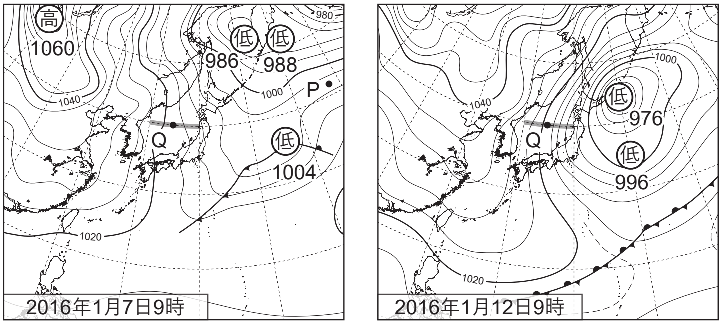
まとめ

・高度約 1km 以上の上空で等圧線が直線状であるとき，空気塊にはたらく気圧傾度力と＿＿＿＿＿がつり合った状態で等圧線と平行に風が吹く。

・そのような風を＿＿＿＿＿といい，その風速は気圧傾度の大きさに＿＿＿＿＿する。

Chapter2　演習問題

次の図は，ある2日の地上天気図です。ここでは，この図を用いて地衡風について確認しましょう。



（データは気象庁による）

問題⑴　左の図のP地点における地衡風の力のつり合いについて述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

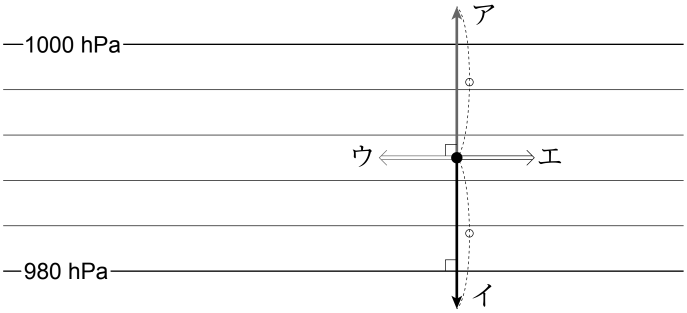
P地点の周辺では等圧線がほぼ緯線と平行であり，気圧は南側より北側の方が（高い / 低い）。そのため，P地点にある空気塊にはたらく気圧傾度力は（北向き / 南向き）である。地衡風は気圧傾度力と転向力がつり合って吹く風なので，P地点で吹く地衡風について考えると，転向力は（北向き / 南向き）である。北半球において転向力は空気塊の進行方向の直角（右向き / 左向き）にはたらくので，P地点の地衡風は（東から西 / 西から東）に吹く（東風 / 西風）である。

問題⑵　左右の図の Q 地点を吹く地衡風について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

　左右の図の太線部における等圧線の間隔を比較すると，右の図は左の図のおよそ（4 倍 / 2 倍 / 半分 / 4 分の 1）である。よって，気圧傾度を比較すると，右の図は左の図のおよそ（4 倍 / 2 倍 / 半分 / 4 分の 1）である。ここで，同じ緯度における地衡風の風速は（気圧傾度 / 気圧傾度の 2 乗）に（比例 / 反比例）する。したがって，Q 地点を吹く地衡風の風速を比較すると，右の図は左の図のおよそ（4 倍 / 2 倍 / 半分 / 4 分の 1）である。

第14講 PART3 確認問題

問１　下の図は，北半球のある地点の高度が約 1 km 以上の上空で，等圧線が平行な直線状になっているときの地衡風の吹き方を示した模式図である。



(1)　図のア，イにあてはまる力の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ア：気圧傾度力　　イ：摩擦力

②　ア：気圧傾度力　　イ：転向力

③　ア：転向力　　イ：摩擦力

④　ア：転向力　　イ：気圧傾度力

(2)　地衡風の向きと風速について最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　向き：図のウ
　　風速：気圧傾度の大きさに比例する

②　向き：図のウ
　　風速：気圧傾度の大きさに反比例する

③　向き：図のエ
　　風速：気圧傾度の大きさに比例する

④　向き：図のエ
　　風速：気圧傾度の大きさに反比例する

< Note >

PART4 傾度風と地上風

目標 等圧線の曲がり方が大きな場所や地表付近における風の吹き方について，説明することができる。

Chapter1　傾度風

地衡風は中～高緯度上空のほとんどの風をうまく表していますが，条件によっては地衡風では考えなかった力が重要となります。ここでは，そのような例の 1 つとして，傾度風について学びましょう。

傾度風

・傾度風とは

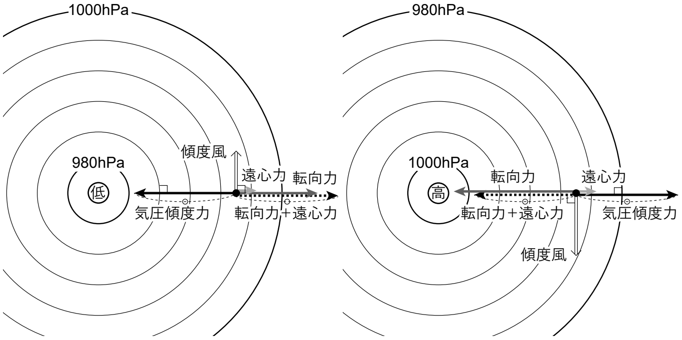
高度約 1km 以上の上空で，等圧線の曲がり方が大きいときについて考える。このとき，摩擦力の大きさは非常に小さいので無視することができるが，遠心力は無視することができない。よって，気圧傾度力，転向力，遠心力の合力が $\vec{0}$ である，つまり，これら 3 つの力がつり合っているとみなすことができる。このような状態で吹く風を**傾度風**という。

知っておこう

等圧線の曲がっている場所といえば低気圧や高気圧のまわりですが，等圧線の間隔や曲がり方はさまざまです。等圧線の間隔が大きく，ゆるやかな弧を描いているときは，遠心力が非常に小さいので地衡風が十分よい近似となります。このことについて，詳しくは演習問題で扱います。

・傾度風の吹き方

遠心力は円運動の中心と反対方向にはたらき，これは等圧線と（平行 / 垂直）な向きの 1 つである。よって，遠心力は気圧傾度力と同じ向きか正反対の向きのいずれかにはたらく。



知っておこう

左の図は，北半球の低気圧や高気圧を模式的に表したものです。南半球では風と転向力の向きの関係が北半球とは逆になるため，同じ気圧配置でも風の円運動が逆回りになります。

→傾度風は（等圧線と平行に ／ 等圧線を横切って）吹き，北半球において低気圧のまわりでは（時計回り ／ 反時計回り），高気圧のまわりでは（時計回り ／ 反時計回り）である。

・**傾度風の風速**

転向力の大きさは風速と（比例 ／ 反比例）する。そのため，気圧傾度力が同じとき，風速は次のように整理できる。

	地衡風	傾度風〔低気圧〕	傾度風〔高気圧〕
転向力の大きさ	気圧傾度力と等しい	気圧傾度力より（大 ／ 小）	気圧傾度力より（大 ／ 小）
風速	中	（大 ／ 小）	（大 ／ 小）

知っておこう

低気圧に風が吹き込まず，高気圧から風が吹き出さないというのは不思議な感じがするかもしれません。

しかし，力の向きを考えた結果からわかるように，気圧傾度力，転向力，遠心力のみを考えたときには風が等圧線を横切りません。風が等圧線を横切るのは，摩擦力のはたらく場所に限られるのです。

まとめ

・高度約 1km 以上の上空で等圧線の曲がり方が大きいとき，空気塊にはたらく気圧傾度力，転向力，________がつり合った状態で等圧線と平行に風が吹く。

・そのような風を________といい，北半球において________のまわりでは時計回り，________のまわりでは反時計回りに吹く。

・その風速を地衡風の風速とくらべると，気圧傾度力が同じであれば________のまわりでは大きく，________のまわりでは小さい。

Chapter2　地上風

ここまでに考えた風は，いずれも上空の風でした。ここでは，地上付近の風について学びましょう。

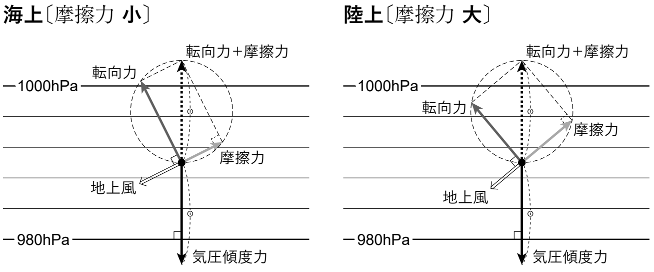
地上風

・地上風とは

高度約 1km 以内の地上付近で，等圧線が直線状になっているときについて考える。このとき，遠心力の大きさは非常に小さいので無視することができるが，摩擦力は無視することができない。よって，気圧傾度力，転向力，摩擦力の合力が $\vec{0}$ である，つまりこれら 3 つの力がつり合っているとみなすことができる。このような状態で吹く風を**地上風**という。

・地上風の吹き方

地上風では摩擦力と転向力の合力が気圧傾度力とつり合っているため，転向力の向きは等圧線と垂直でなく，風の向きは等圧線と平行でない。



知っておこう

左の図は，北半球の地上風の力のつり合いを模式的に表したものです。南半球では風と転向力の向きの関係が北半球とは逆になるため，同じ気圧配置でも風が左から右に向かうように吹きます。

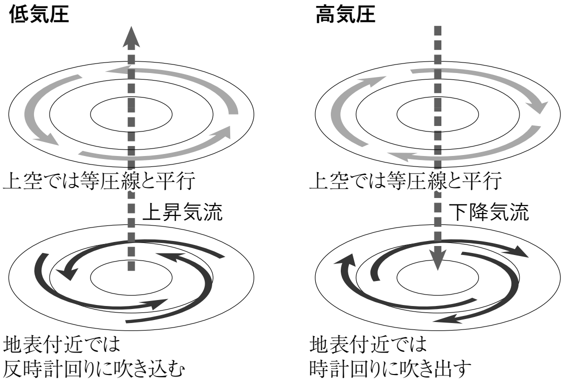
→地上風は等圧線を（高圧側から低圧側 / 低圧側から高圧側）に横切って吹き，地上風が等圧線となす角は海上よりも陸上の方が（大きい / 小さい）。

・低気圧や高気圧のまわりを吹く地上の風

等圧線が直線状であるときと同様に，等圧線が大きく曲がっているときも，地上付近では摩擦力を無視できない。

そのため，低気圧のまわりの地上付近では風が等圧線を横切って(中心へと吹き込む / 外側に吹き出る)。これに伴って，中心付近の上空には（上昇気流 / 下降気流）が生じる。

また，高気圧のまわりの地上付近では風が等圧線を横切って（中心へと吹き込む / 外側に吹き出る)。これに伴って，中心付近の上空には（上昇気流 / 下降気流）が生じる。



まとめ

・高度約 1km 以内の地上付近で等圧線が直線状であるとき，空気塊にはたらく気圧傾度力，転向力，________がつり合った状態で風が吹く。

・この風は_______側から_______側へと等圧線を横切るように吹き，この風が等圧線となす角は海上よりも陸上の方が________。

・低気圧のまわりの地上付近では風が等圧線を横切って中心へと吹き込み，中心付近の上空には_______気流が生じる。

・高気圧のまわりの地上付近では風が等圧線を横切って外側へと吹き出し，中心付近の上空には_______気流が生じる。

Chapter3　演習問題

ここでは，傾度風の性質について確認しましょう。

問題⑴　傾度風の力のつり合いについて述べた次の文章中の空欄［　**ア**　］に入る式を答えましょう。式には文章中にある文字を用いてください。ただし，v は風速，Ω は地球の自転角速度，ϕ は緯度，r は円運動の半径です。

単位質量の空気塊にはたらく転向力と遠心力の大きさを，それぞれ a_C，a_F とする。

$$a_C = 2v\Omega\sin\phi$$

$$a_F = \frac{v^2}{r}$$

と表せるので，単位質量の空気塊にはたらく遠心力の大きさの転向力の大きさに対する比の値を R_{FC} とおくと，

$$R_{FC} = \frac{a_F}{a_C}$$

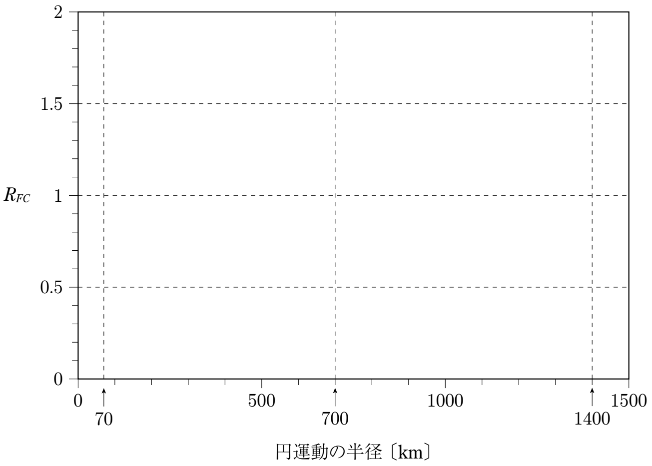
$$= [\quad \textbf{ア} \quad]$$

である。

問題⑵　問題⑴の結果について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。また，空欄［　**イ**　］に入る数値を上から 1 桁の概数で答えましょう。ただし，緯度 30° の地点について考え，地球の自転角速度を 7×10^{-5} rad/s とします。

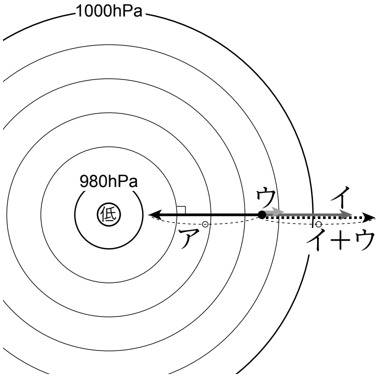
問題⑴の結果より，風速が 5m/s，円運動の半径が 700km のとき，遠心力の大きさは転向力の大きさの約［　**イ**　］倍である。また，単位質量の空気塊にはたらく遠心力の大きさの転向力の大きさに対する比の値は風速に（比例 / 反比例）し，円運動の半径に（比例 / 反比例）する。

問題⑶　問題⑵の結果を用いて，風速が 5m/s，50m/s のそれぞれのときについて，横軸に円運動の半径，縦軸に R_{FC} をとったグラフを描きましょう。また，それらのグラフを参考に，遠心力を無視して地衡風の力のつり合いを考えてよいのはどのような場合かを考えて簡潔に答えましょう。



第 14 講　PART4　確認問題

問 1　下の図は，北半球での低気圧において，高度約 1 km 以上の上空の空気塊にはたらく 3 つの力ア～ウがつり合って風が吹いているようすを表している。



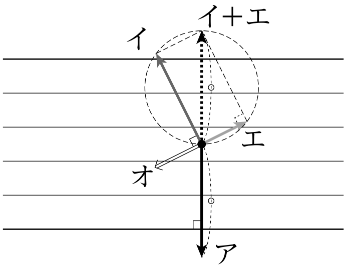
(1)　図のア～ウにあてはまる力の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ア：気圧傾度力　イ：転向力　ウ：遠心力
②　ア：気圧傾度力　イ：遠心力　ウ：転向力
③　ア：転向力　イ：気圧傾度力　ウ：遠心力
④　ア：転向力　イ：遠心力　ウ：気圧傾度力

(2)　このときに吹く風の名称と向きの組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　名称：地衡風　向き：等圧線と平行に時計回り
②　名称：地衡風　向き：等圧線と平行に反時計回り
③　名称：傾度風　向き：等圧線と平行に時計回り
④　名称：傾度風　向き：等圧線と平行に反時計回り

問２　下の図は，北半球の高度約 1km 以内の地上付近で，等圧線が平行な直線状になっているときの風の吹き方を模式的に表したものである。



⑴　エの力とオの風の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　エ：摩擦力　　オ：地衡風
②　エ：摩擦力　　オ：地上風
③　エ：遠心力　　オ：地衡風
④　エ：遠心力　　オ：地上風

⑵　オの風は，等圧線を横切って，（　カ　）に吹き，等圧線となす角は，（　キ　）が大きくなる。
空欄カ，キに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　カ：高圧側から低圧側　　キ：海上より陸上
②　カ：高圧側から低圧側　　キ：陸上より海上
③　カ：低圧側から高圧側　　キ：海上より陸上
④　カ：低圧側から高圧側　　キ：陸上より海上

問３　北半球で，高気圧のまわりの地上付近で吹く風に関する説明として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　中心に向かって時計回りに吹き込む。
②　中心に向かって反時計回りに吹き込む。
③　外側に向かって時計回りに吹き出す。
④　外側に向かって反時計回りに吹き出す。

PART5 局地風

目標　海陸風と山谷風の風向がどのように変化するかを説明できる。

Chapter1　局地風

日々の天気図は，数百 km ～数千 km という大きな空間スケールの現象を表しています。ここでは，それより小さな数十 km ～数百 km 程度の空間スケールで吹く風について学びましょう。

局地風

・局地風とは

数 km ～数百 km 程度の限られた範囲で吹く，その地域に特徴的な風を**局地風**という。

・局地風の吹きやすい条件

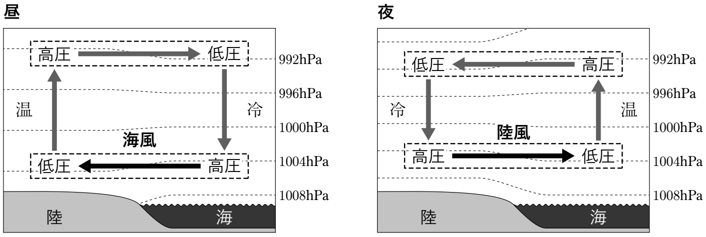
局地風は，より大きな空間スケールの現象の影響が小さいとき，つまり天気図における等圧線の間隔が（大きい ／ 小さい）ときに吹きやすい。

海陸風

・海陸風とは

穏やかに晴れた日の海岸付近において，1 日周期で風向を変化させる局地風を**海陸風**という。

・海陸風の吹き方



知っておこう

海風と陸風の入れ替わる時間帯は風が弱くなり，これを凪（なぎ）といいます。

→地表の気圧は相対的に（温かい ／ 冷たい）側の方が高く，昼間には（海風 ／ 陸風），夜間には（海風 ／ 陸風）が吹く。

山谷風

・**山谷風とは**

穏やかに晴れた日の山岳地域において，1 日周期で風向を変化させる局地風を**山谷風**という。

・**山谷風の吹き方**

山岳地域では地表面の傾き方が大きく，同じ標高の大気と地表面が接しているとみることができる。

同じ標高の大気と地表面をくらべると，昼間には地表面の方が（温かく ／ 冷たく），夜間には地表面の方が（温かい ／ 冷たい）。

→昼間には斜面を（上昇 ／ 下降）する（山風 ／ 谷風），夜間には斜面を（上昇 ／ 下降）する（山風 ／ 谷風）が吹く。

まとめ

・数十 km ～数百 km 程度の空間スケールで吹く，その地域に特徴的な風を局地風という。
・穏やかに晴れた日の海岸付近では，昼間には______，夜間には______が吹く。
・穏やかに晴れた日の山岳地域では，昼間には______，夜間には______が吹く。

Chapter2　演習問題

ここでは，海陸風について確認しましょう。

問題(1)　海面と陸面の温度変化について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

よく晴れた昼間には，地表面が太陽放射によって温められる。このとき，海面より陸面の方が（温まりやすい / 温まりにくい）ため，相対的に（高温 / 低温）となる。

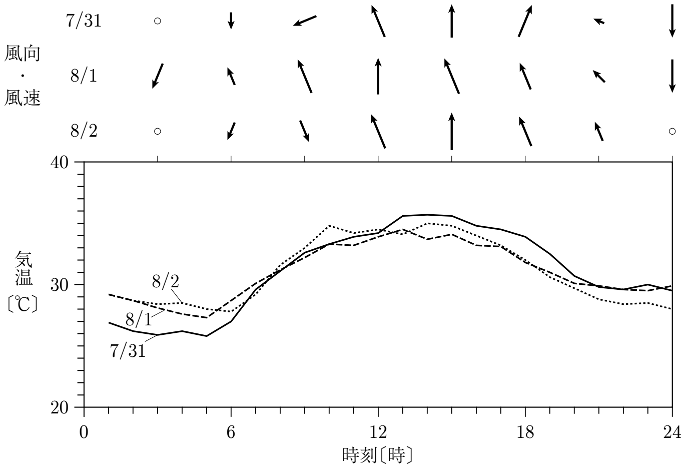
また，よく晴れた夜間には，地表面からの赤外放射のうち雲や水蒸気によって吸収される割合が（大きい / 小さい）ため，地表面の温度が下がりやすい。これによって地表面の温度が下がることを放射冷却といい，特に（海面 / 陸面）の温度が下がりやすい。そのため，海面より陸面の方が相対的に（高温 / 低温）となる。

これらのことから，晴れた日には海面と陸面の温度の関係が昼と夜で逆転する。

問題(2)　海陸風について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

同じ質量の空気塊は気温が高いほど体積が（大きい / 小さい）ため，異なる気圧の等圧面どうしの間隔は気温が高いほど（大きい / 小さい）。その結果として，地表付近では気温の高い側が（高圧 / 低圧），上空では気温の高い側が（高圧 / 低圧）となる。風は（高圧側から低圧側 / 低圧側から高圧側）へと等圧面を横切って吹くため，地表付近と上空では逆向きに風が吹き，その間で循環が生じる。この循環のうち地表付近の風が海陸風である。

問題⑶ 次の図は，海岸付近の地点Ａにおける連続する３日間の気温および風向・風速のようすを示しています。この３日間は日本列島の広い範囲が高気圧に覆われ，地点Ａでも穏やかな晴天となりました。この図について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。ただし，図の風向・風速の矢印は風の向きと強さを模式的に示しています。図の上が北を表し，○は風が非常に弱かったことを示します。



この３日間において，気温は日によってやや異なるが，気温の変化のパターンはほぼ同じである。それに対応して，風向・風速も似たような変化を示している。

この図の風が典型的な海陸風であるとすると，海岸線は地点Ａの（北側 / 東側 / 南側 / 西側）にあり，（南北 / 東西）方向にのびていると考えられる。

第14講 PART5 確認問題

問１ 次の文章を読み，下の問いに答えよ。

数十～数百 km 程度の限られた範囲で吹く，その地域に特徴的な風のことを（ ア ）という。（ ア ）には海岸付近で吹く（ イ ）や山岳地域で吹く（ ウ ）があり，ともに（ エ ）の周期で風向が変化する。これらの風に共通していることは，地表面の温まり方の違いにより，温かくなる部分と，それほど温かくならない部分が生じ，それが原因となって風が生じることである。

(1) 空欄アに入る語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① 地衡風　　② 傾度風
③ 地上風　　④ 局地風

(2) 空欄イ，ウに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① イ：季節風　ウ：フェーン
② イ：季節風　ウ：山谷風
③ イ：海陸風　ウ：フェーン
④ イ：海陸風　ウ：山谷風

(3) 空欄イの風が昼間に吹く方向と，その名称の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① 方向：海から陸へ　名称：海風
② 方向：海から陸へ　名称：陸風
③ 方向：陸から海へ　名称：海風
④ 方向：陸から海へ　名称：陸風

⑷　空欄ウの風が昼間に吹く方向と，その名称の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　方向：山の斜面に沿って吹き上がる　　名称：山風
②　方向：山の斜面に沿って吹き上がる　　名称：谷風
③　方向：山の斜面に沿って吹き下りる　　名称：山風
④　方向：山の斜面に沿って吹き下りる　　名称：谷風

⑸　空欄エに入る語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　数時間　　②　1 日
③　数日　　④　1 か月

PART6 季節風

目標　季節風の風向がどのように変化するかを説明できる。

Chapter1　季節風

日々の天気図は，刻々と変化する気象条件の一部を切り取ったものです。これを長期的に平均すると，季節ごとの平均的な気象条件を知ることができます。ここでは，季節ごとに特徴的な風について学びましょう。

季節風

・大陸と海洋の性質

岩石と水の比熱をくらべると，（岩石 / 水）の方が数倍程度大きい。

また，表層の海水では伝導と対流によって熱が伝えられるが，岩石中では対流が起こらない。そのため，1 年間で温度が変化する層の厚さが海洋では（数 m ～ 10m / 数十 m ～ 100m）程度なのに対して，大陸ではその 10 分の 1 程度である。岩石の密度が水の密度より 2 ～ 3 倍程度大きいこととあわせると，1 年間に温度が変化する層の質量は，（岩石 / 水）の方が数倍程度大きいといえる。

以上より，岩石の熱容量の方が水の熱容量よりも（大きい / 小さい）。つまり，大陸の方が海洋より（温まりやすく / 温まりにくく），（冷めやすい / 冷めにくい）。

知っておこう

単位質量の物質を単位温度だけ温めるために必要な熱量を**比熱**，ある物質を単位温度だけ温めるために必要な熱量を**熱容量**といいます。

熱容量は比熱と質量の積として求められます。

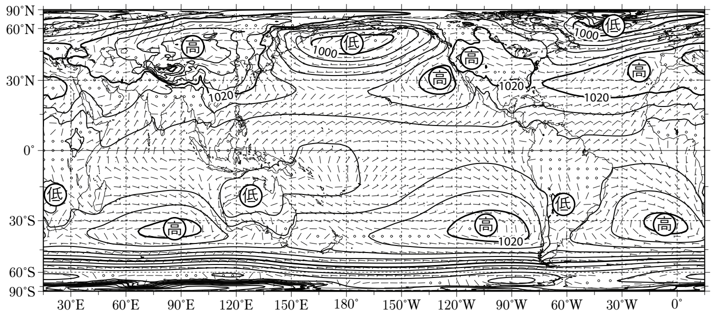
・季節風とは

大陸は海洋とくらべて夏と冬の温度差が（大きく / 小さく），季節によって温度の関係が入れ替わる。これにより地球規模で気圧配置が変化して，大陸の縁では季節によって風向が変化する。この風を**季節風**という。

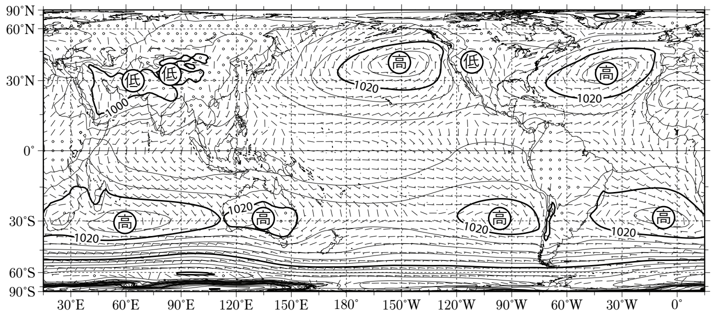
・平年の気圧配置・風向

1月

（気象庁による JRA−55 のデータをもとに作成）



7月



・冬と夏の気圧と風

冬には大陸の方が海洋より（高圧 / 低圧）で，（大陸から海洋 / 海洋から大陸）に向かう風が吹く。夏にはその関係が逆になる。

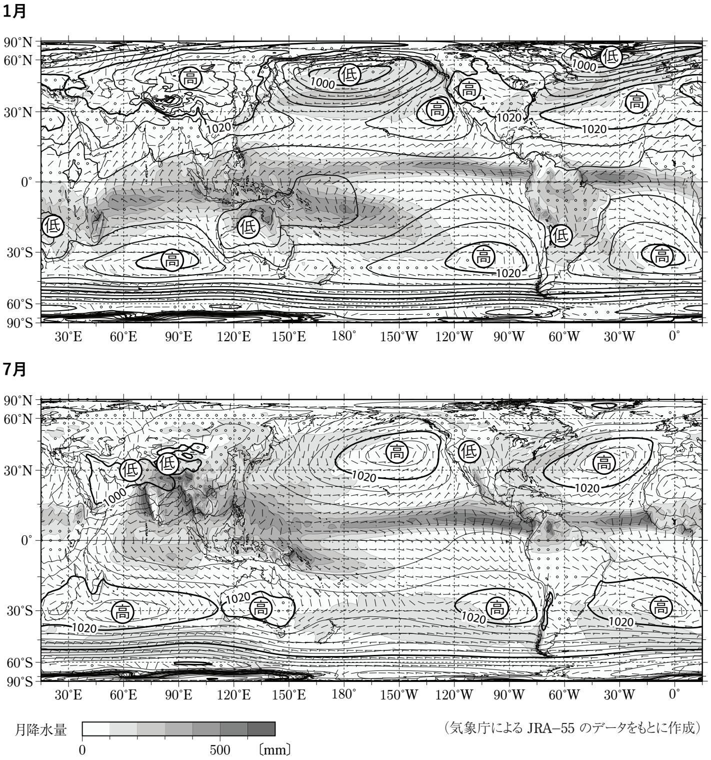
季節による風向の違いが大きいのは，大陸の占める面積の割合が大きい（北半球 / 南半球）である。

まとめ

- 大陸は海洋より熱容量が________ため，海洋とくらべて夏には温度が______，冬には温度が________。
- 大陸と海洋の温度の関係の変化により地球規模の気圧配置も変化し，大陸には夏に________，冬に________が形成されやすい。
- これにより季節によって風向の変化する風を________という。

Chapter2　演習問題

　次の図は，平年の気圧配置と風向に加えて降水量の分布を示した図です。ここでは，この図を用いて季節による全球的な気象の変化について確認しましょう。



（気象庁による JRA−55 のデータをもとに作成）

ここがPOINT

左の図の風は，矢羽根の羽がある方が風上側を表します。記号が小さくて風上側を読み取りにくい場合は，高気圧や低気圧のまわりの風向の特徴を参考に考えてみましょう。

問題⑴　冬の気圧配置と風向について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

　冬には海洋とくらべて大陸の方が（高温 / 低温）である。北半球の冬にあたる 1 月には，北太平洋や北大西洋などの海上は（上昇 / 下降）気流の発生する（高気圧 / 低気圧），ユーラシア大陸や北米大陸などの陸上は（上昇 / 下降）気流の発生する（高気圧 / 低気圧）となっている。それに伴って，日本列島付近では（北より / 南より），インドの西の海上では（北より / 南より）の風が吹いている。

問題⑵ 夏の気圧配置と風向について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

夏には海洋とくらべて大陸の方が（高温 / 低温）である。北半球の夏にあたる７月には，北太平洋や北大西洋などの海上は（上昇 / 下降）気流の発生する（高気圧 / 低気圧），ユーラシア大陸や北米大陸などの陸上は（上昇 / 下降）気流の発生する（高気圧 / 低気圧）となっている。それに伴って，日本列島付近では（北より / 南より），インドの西の海上では（東より / 西より）の風が吹いている。

問題⑶ 降水量について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

まず，１月と７月の両方の図に共通する特徴について考える。赤道付近には降水量の多い帯状の領域があり，これは（熱帯収束帯 / 停滞前線）に伴う降水を表している。また，南北両半球の中緯度にも降水量の比較的多い帯状の領域があり，これは（温帯低気圧 / 停滞前線）に伴う降水を表している。

次に，季節によって異なる特徴について考える。北半球の夏にあたる７月には，インドから日本列島にかけての幅広い地域で１月とくらべて降水量が多い。インドでは南東側とくらべて南西側の沿岸部の降水量が多く，これは季節風の風向から説明できる。また，日本列島の降水はおもに（台風 / 停滞前線）によるものである。

第 14 講　PART6　確認問題

問１　次の文章を読み，下の問いに答えよ。

大陸と海洋の熱容量をくらべると，大陸の方が（　ア　）。そのため，夏は海洋にくらべて（　イ　）となり，冬は海洋にくらべて（　ウ　）となる。このように大陸と海洋の温度の関係が夏と冬で入れ替わるので，a 地球規模の気圧配置が変化する。その結果，生じる風を（　エ　）という。

(1)　空欄ア，イ，ウに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ア：大きい　　イ：高温　　ウ：低温
②　ア：大きい　　イ：低温　　ウ：高温
③　ア：小さい　　イ：高温　　ウ：低温
④　ア：小さい　　イ：低温　　ウ：高温

(2)　下線部 a について，気圧配置と風向の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　夏：大陸に高気圧，風向は大陸から海洋へ
　　冬：海洋に高気圧，風向は海洋から大陸へ
②　夏：海洋に高気圧，風向は海洋から大陸へ
　　冬：大陸に高気圧，風向は大陸から海洋へ
③　夏：大陸に高気圧，風向は海洋から大陸へ
　　冬：海洋に高気圧，風向は大陸から海洋へ
④　夏：海洋に高気圧，風向は大陸から海洋へ
　　冬：大陸に高気圧，風向は海洋から大陸へ

(3)　空欄エに入る語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　局地風　　②　山谷風
③　海陸風　　④　季節風

＜ Note ＞

PART7 熱帯低気圧と台風

目標　熱帯低気圧が発生・発達する原理や，発生・発達する場所について説明できる。

Chapter1　熱帯低気圧と台風

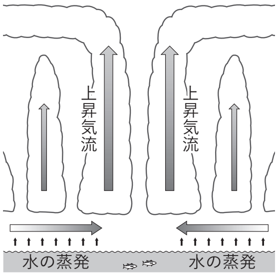
熱帯低気圧は，日本列島をはじめとする世界各地に大きな影響を及ぼします。ここでは，熱帯低気圧が発生・発達する原理について学びましょう。

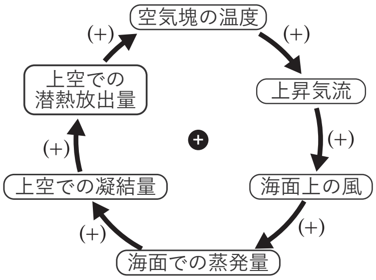
熱帯低気圧

・熱帯低気圧とは

熱帯の温かい海面から生じた水蒸気が上空で積乱雲をつくり，それがいくつも集まって渦を形成したものを**熱帯低気圧**という。

・熱帯低気圧が発生・発達する原理





→海面で蒸発した水の潜熱が上昇気流を強化して，さらに蒸発を促進させる（正 / 負）のフィードバックがはたらく。

・熱帯低気圧の発生・発達する条件

水の蒸発がさかんに起こることが必要なので，熱帯低気圧は海面水温が約（17℃ / 27℃）以上の海域で発生・発達する。

また，低気圧の渦ができるためには空気塊に転向力がはたらく必要があるので，熱帯低気圧は緯度が約（5° / 17°）以上の海域で発生・発達する。

台風

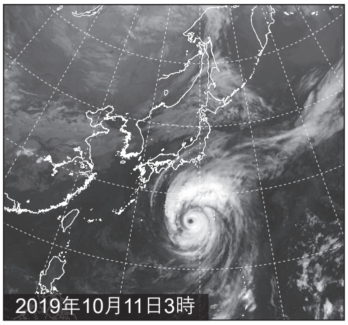
・台風とは

熱帯低気圧のうち，北西太平洋または南シナ海に存在し，最大風速が約（17 / 25）m/s 以上のものを**台風**とよぶ。

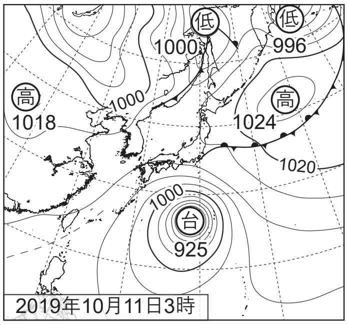
知っておこう

発達した熱帯低気圧は海域によって異なる名前で呼ばれており，その定義も異なっています。たとえば，北東太平洋や大西洋などではハリケーンと呼ばれていますが，「ハリケーン」は概ね「強い台風」（最大風速約 33m/s 以上）にまで発達した熱帯低気圧です。

・台風の構造



（データは気象庁／千葉大学による）



（データは気象庁による）

→等圧線は同心円状で（温暖前線と寒冷前線を伴い / 前線を伴わず），発達した台風の中心付近には穏やかな（上昇気流 / 下降気流）の領域である台風の目が存在する。

まとめ

- 熱帯低気圧は，海面から蒸発した水が上空で＿＿＿＿を放出することで上昇気流を強化して，さらに蒸発を促進するという＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿により発生・発達する。
- 熱帯低気圧は，海面水温が約＿＿℃以上となっている，緯度約＿＿° 以上の海域で発生・発達する。
- 熱帯低気圧のうち，北西太平洋または南シナ海に存在し，最大風速が約＿＿m/s 以上のものを台風という。

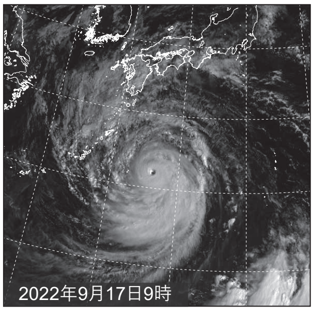
Chapter2　演習問題

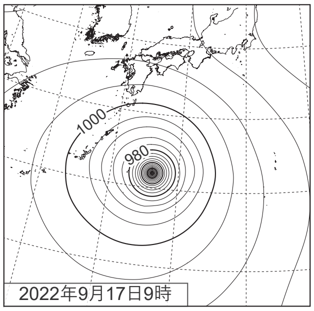
ここでは，熱帯低気圧や台風について確認しましょう。

問題⑴　熱帯低気圧について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

熱帯の温かい海面から生じた水蒸気が上空で（乱層雲 / 積乱雲）をつくり，それがいくつも集まって渦を形成したものを熱帯低気圧という。熱帯低気圧の地表付近では空気塊に（遠心力 / 摩擦力）がはたらくため，風は等圧線を横切って吹く。北半球の熱帯低気圧において，地表付近の風は（時計回り / 反時計回り）である。

問題⑵　次の図は，台風が日本列島に接近した日の気象衛星の可視画像と地上天気図です。これらの図について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

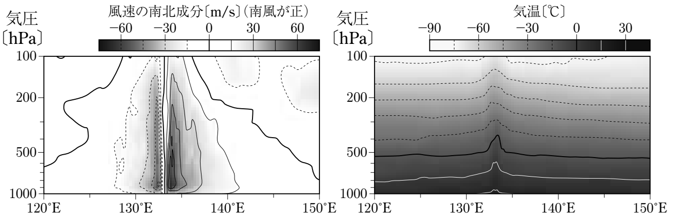




（データは気象庁による）

図の中心付近にある渦は地上天気図で同心円状の等圧線をもち，発達した熱帯低気圧であることがわかる。この低気圧の中心の東西で比較すると，等圧線の間隔は東側の方が（広く / 狭く），風が（強い / 弱い）ことが予想される。また，この熱帯低気圧が台風に分類されるのは，中心付近の最大風速が約（15 / 17 / 25 / 33）m/s 以上と判定されたためである。

問題⑶　次の図は，**問題⑵**の台風の中心を通る東西断面について，風速の南北成分と気温を示しています。これらの図について述べた下の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。



（データは気象庁による）

左の図は風速の南北成分を表しており，等値線が実線の部分は風速が正，すなわち（北風 / 南風）であることを示している。同様に，等値線が破線の部分は風速が負，すなわち（北風 / 南風）であることを示している。

台風の中心付近では，図中のどの高度でも中心の東側で（北風 / 南風)，西側で（北風 / 南風）である。これは，台風の中心のまわりで（時計回り / 反時計回り）に風が吹いていることに対応する。

一方，上空に行くにしたがって風速 0m/s の等値線が台風の中心に近づいている。その外側では（時計回り / 反時計回り）に風が吹いており，これは（高気圧 / 低気圧）の風の吹き方である。つまり，台風は地表付近で（高気圧 / 低気圧）として周囲から風を吸い込み，上空では（高気圧 / 低気圧）として周囲に風を吹き出している。

また，右の図は気温の分布を表しており，台風の中心付近では等値線が盛り上がっているように見える。たとえば，300hPa 等圧面における気温は，東経 150 度とくらべて台風の中心付近で（15℃ / 30℃）程度（高い / 低い）ことが読み取れる。このような特徴的な気温分布は，台風の目の周辺で雲が発達するときに起こる（顕熱 / 潜熱）の放出がおもな原因である。

第14講　PART7　確認問題

問１　次の文章を読み，下の問いに答えよ。

熱帯低気圧が発生・発達するのは，

・水の蒸発がさかんに起こる海面水温が高い海域

・低気圧の渦ができるために必要な（　ア　）がはたらく緯度がおよそ（　イ　）の海域

である。北太平洋西部で発生する熱帯低気圧のうち，a一定の条件を満たしたものを台風という。

(1)　空欄ア，イに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ア：転向力　　イ：５度以下

②　ア：転向力　　イ：５度以上

③　ア：摩擦力　　イ：５度以下

④　ア：摩擦力　　イ：５度以上

(2)　熱帯低気圧が発達する原理として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　海面で蒸発した水の顕熱が下降気流を強化する。

②　海面で蒸発した水の顕熱が上昇気流を強化する。

③　海面で蒸発した水の潜熱が下降気流を強化する。

④　海面で蒸発した水の潜熱が上昇気流を強化する。

(3)　下線部ａの条件として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　最大風速が約 17 m/s 以上

②　平均風速が約 17 m/s 以上

③　最大風速が約 34 m/s 以上

④　平均風速が約 34 m/s 以上

⑷　台風の構造として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　等圧線は同心円状で，中心付近では上昇気流が起こっている。

②　等圧線は同心円状で，中心付近では下降気流が起こっている。

③　等圧線は平行線状で，中心付近では上昇気流が起こっている。

④　等圧線は平行線状で，中心付近では下降気流が起こっている。

PART8 偏西風波動と温帯低気圧

目標　偏西風の吹き方の南北半球や季節による違いと，温帯低気圧の立体構造を説明することができる。

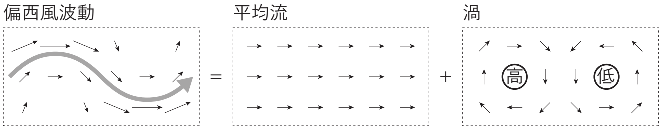
Chapter1　偏西風波動

地学基礎では，地球の中緯度地域の上空に偏西風が吹いていることを学んでいます。ここでは，偏西風の吹き方について学びましょう。

偏西風波動とその変動

・偏西風波動とは

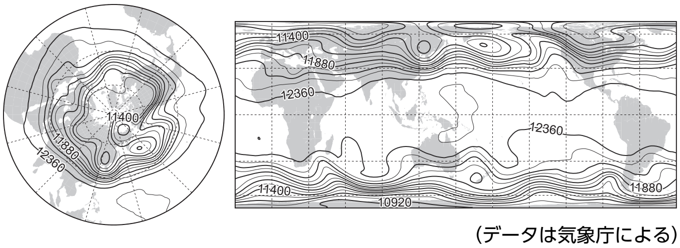
1 年を平均してみたとき，中緯度では対流圏全体で西風が吹いている。これを**偏西風**といい，偏西風は極のまわりを南北に蛇行しながら周回する。地球を周回するこの波動を**偏西風波動**といい，平均流としての西風に低気圧や高気圧の渦を重ね合わせたものとみなすことができる。



・等圧面天気図で見た偏西風波動

極を中心とした等圧面天気図で見たとき，偏西風波動は等高度線の真円からの凹凸として表現される。

200hPa等圧面天気図（日本時間 2022年12月22日9時）



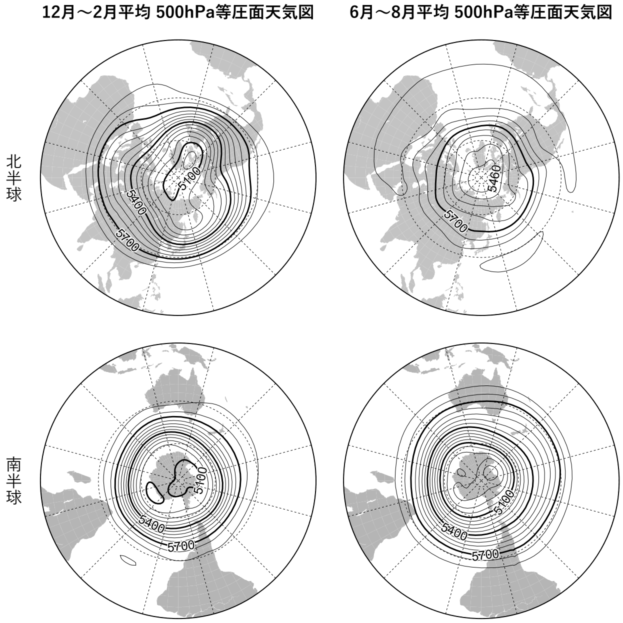
（データは気象庁による）

・偏西風の平均流の南北半球や季節による違い

偏西風はほぼ地衡風とみなせるため，等圧面天気図からその流れを読み取ることができる。

偏西風の吹き方は，（北半球 / 南半球）の方が真円に近い。これは，北半球は大陸と海洋が入り組んでいるのに対して，南半球には大陸が少ないためである。

北半球では冬の方が等高度線の間隔が（広く / 狭く），気圧傾度が（大きい / 小さい）ため，偏西風の風速が（大きい / 小さい）。



（データは気象庁による）

まとめ

・偏西風は極のまわりを南北に蛇行しながら周回しており，これを＿＿＿＿＿＿＿という。

・偏西風の流れを南北半球で比較すると，＿＿＿＿＿の方が真円に近い。

・北半球の偏西風の流れを夏と冬で比較すると，気圧傾度の大きな＿＿＿の方が風速は＿＿＿＿＿。

Chapter2　温帯低気圧

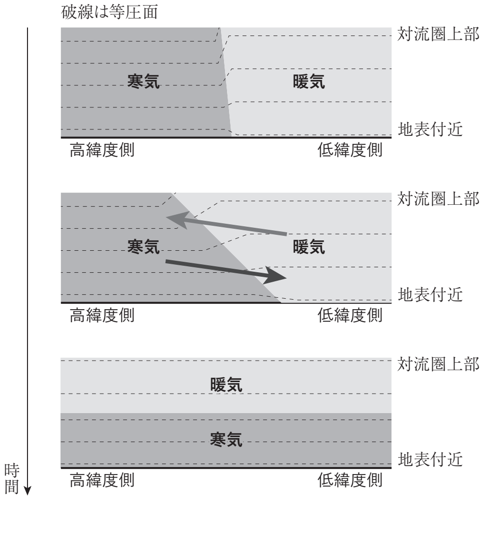
偏西風波動は，地表の温帯低気圧と密接に関わっています。ここでは，温帯低気圧の立体構造について学びましょう。

温帯低気圧

・温帯低気圧とは

中緯度地域では南北方向の温度勾配が大きく，暖気と寒気が水平方向に接したような力学的に不安定な状態になっている。そのため，高緯度側の密度の（大きな / 小さな）寒気が下降し，低緯度側の密度の（大きな / 小さな）暖気が上昇することで，より力学的に安定な状態を取ろうとする。このとき形成される渦を**温帯低気圧**という。

温帯低気圧の発達のエネルギーは，上空にあった寒気のもつ位置エネルギーが変換されたものだと考えることができる。

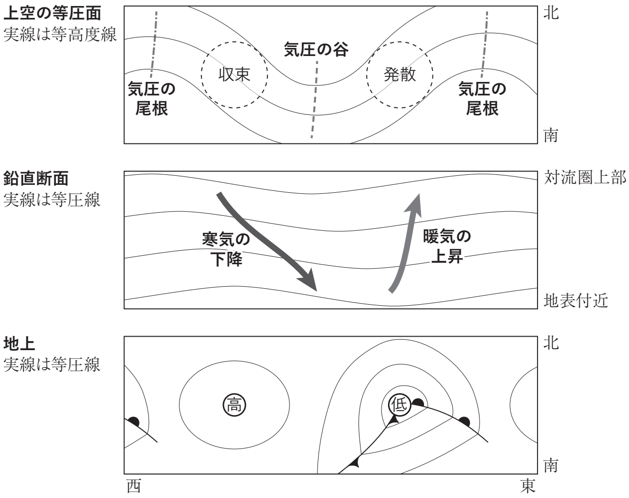


・**発達する温帯低気圧の立体構造**

上空の偏西風波動において，気圧の尾根から谷に向かう部分では空気の（収束 / 発散）が起こり,（上昇気流 / 下降気流）が生じる。これは，高緯度側の上空の寒気が低緯度側の地表付近に向かう流れである。

反対に，気圧の谷から尾根に向かう部分では空気の（収束 / 発散）が起こり,（上昇気流 / 下降気流）が生じる。これは，低緯度側の地表付近の暖気が高緯度側の上空に向かう流れである。

これらの流れが地上の温帯低気圧と対応するとき，温帯低気圧は発達する。これは，地上の温帯低気圧の中心が上空の気圧の谷の（東側 / 西側）に位置するときである。



まとめ

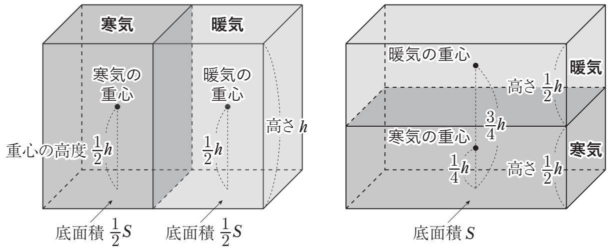
・温帯低気圧は，南北方向の温度勾配の大きな中緯度において，上空にあった寒気のもつ＿＿＿＿エネルギーをもとに発達する低気圧である。

・温帯低気圧が発達しやすいのは，地上の温帯低気圧の中心が上空の気圧の谷の＿＿＿側に位置しているときである。

Chapter3　演習問題

ここでは，単純なモデルや具体的な例を用いながら，温帯低気圧について確認していきましょう。

問題(1)　次の図は，寒気と暖気が水平方向に接した状態と，上下に接した状態を模式的に表しています。これらの図について述べた次の文章中の空欄［　**ア**　］～［　**キ**　］に入る式を答えましょう。式には文章中にある文字を用いてください。ただし，寒気の密度はρ_1，暖気の密度はρ_2でそれぞれ一定であるものとして，重力加速度をgとします。



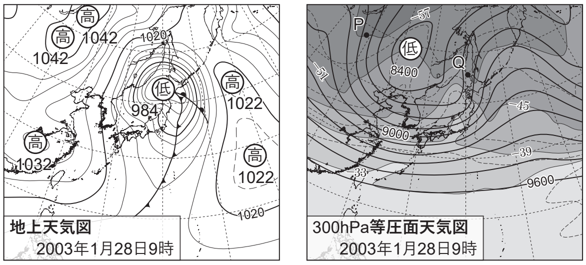
重心の高度がhである質量mの物体のもつ位置エネルギーは，mghと表せる。

左の図のように直方体状の寒気と暖気が水平方向に接しているときについて考える。寒気と暖気は体積が等しいが，寒気の質量は［　**ア**　］，暖気の質量は［　**イ**　］である。よって，寒気のもつ位置エネルギーは［　**ウ**　］，暖気のもつ位置エネルギーは［　**エ**　］である。

一方，右の図のように直方体状の寒気と暖気が上下に接しているとき，寒気のもつ位置エネルギーは［　**オ**　］，暖気のもつ位置エネルギーは［　**カ**　］である。

寒気の密度ρ_1が暖気の密度ρ_2より大きいことに注意すると，寒気と暖気の位置エネルギーの和は，右の図のときの方が左の図のときとくらべて［　**キ**　］だけ小さいといえる。

問題⑵ 次の図は，ある日の地上天気図と 300hPa 等圧面天気図です。これらの図について述べた下の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。ただし，300hPa 等圧面天気図の太線は等圧面の等高度線で，数値は等圧面の高度〔m〕を表します。また，300hPa 等圧面天気図の細線は等温線で，数値は気温〔℃〕を表します。



（データは気象庁による）

300hPa 等圧面天気図の等高度線に沿って吹く地衡風と等温線との関係に着目しよう。地衡風は図の P 地点付近において等温線を（高温側から低温側 / 低温側から高温側）に横切るため，ここでは高緯度側の（暖気 / 寒気）を低緯度側に運ぶような風が吹いているといえる。また，地衡風は図の Q 地点付近において等温線を（高温側から低温側 / 低温側から高温側）に横切るため，ここでは低緯度側の（暖気 / 寒気）を高緯度側に運ぶような風が吹いているといえる。これらはいずれも低緯度側と高緯度側の温度差を小さくするはたらきをもち，南北方向の熱輸送を担っている。

さらに，300hPa 等圧面天気図において，日本列島の（東側 / 西側）に気圧の谷が確認できる。地上天気図における低気圧の中心は北海道付近なので，これは上空の気圧の谷の（東側 / 西側）にあたる。よって，この低気圧はこれから（発達する / 衰退する）と予想される。

第14講 PART8　確認問題

問 1　次の文章を読み，下の問いに答えよ。

偏西風とは，中緯度地域の上空の（　ア　）全体で，1 年を通して吹いている（　イ　）風のことである。偏西風は極のまわりを（　ウ　）に大きく蛇行しながら回っており，これを偏西風波動という。

(1)　空欄アに入る語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　対流圏　　②　成層圏

③　中間圏　　④　熱圏

(2)　空欄イ，ウに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　イ：東　　ウ：東西

②　イ：東　　ウ：南北

③　イ：西　　ウ：東西

④　イ：西　　ウ：南北

(3)　偏西風の流れが真円に近いのは南北半球のどちらか。また，北半球で偏西風の風速が大きいのは夏冬のどちらか。最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　流れ：北半球　　風速：夏

②　流れ：北半球　　風速：冬

③　流れ：南半球　　風速：夏

④　流れ：南半球　　風速：冬

問２　次の文章を読み，下の問いに答えよ。

温帯低気圧は，a寒気と暖気が水平方向に接しているところで発生する。

温帯低気圧は偏西風波動と関連しており，気圧の尾根から谷に向かうところでb上空の寒気が地表付近に下降する。また，気圧の谷から尾根に向かうところで地表付近の暖気が上空に上昇する。このため，温帯低気圧の中心が気圧の（　エ　）側に位置しているとき，低気圧は発達する。

⑴　下線部ａについて，このようなところでの寒気の動きとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　高緯度側の寒気が下降する。
②　低緯度側の寒気が下降する。
③　高緯度側の寒気が上昇する。
④　低緯度側の寒気が上昇する。

⑵　下線部ｂについて，このような気流が生じる理由として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　上空で空気の発散が起こって，上昇気流が生じるため。
②　上空で空気の発散が起こって，下降気流が生じるため。
③　上空で空気の収束が起こって，上昇気流が生じるため。
④　上空で空気の収束が起こって，下降気流が生じるため。

⑶　空欄エに入る語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　尾根の西　　②　尾根の南
③　谷の西　　④　谷の南

PART9 高気圧

目標　背の高い高気圧と背の低い高気圧の違いについて，説明することができる。

Chapter1　高気圧

ここまでに，低気圧として熱帯低気圧と温帯低気圧について学びました。ここでは，異なる性質をもつ 2 種類の高気圧について学びましょう。

高気圧

・背の低い高気圧

冬の大陸の内陸部では，放射冷却によって地表面の温度が極端に低下する。冷たい地表面によって対流圏下層の空気が冷やされると，密度が（大きく / 小さく）なる。このとき対流圏の下層のみ周囲より気圧が高くなる。

このような，地上天気図では明瞭だが対流圏中層～上層の等圧面天気図では確認できない高気圧を**背の低い高気圧**という。

・**背の高い高気圧**

赤道付近から亜熱帯には，鉛直循環であるハドレー循環が生じている。そのため，亜熱帯の上空は対流圏のほぼ全体で（上昇気流 / 下降気流）となっている。このとき対流圏の下層から中層にかけては周囲より気圧が高くなる。

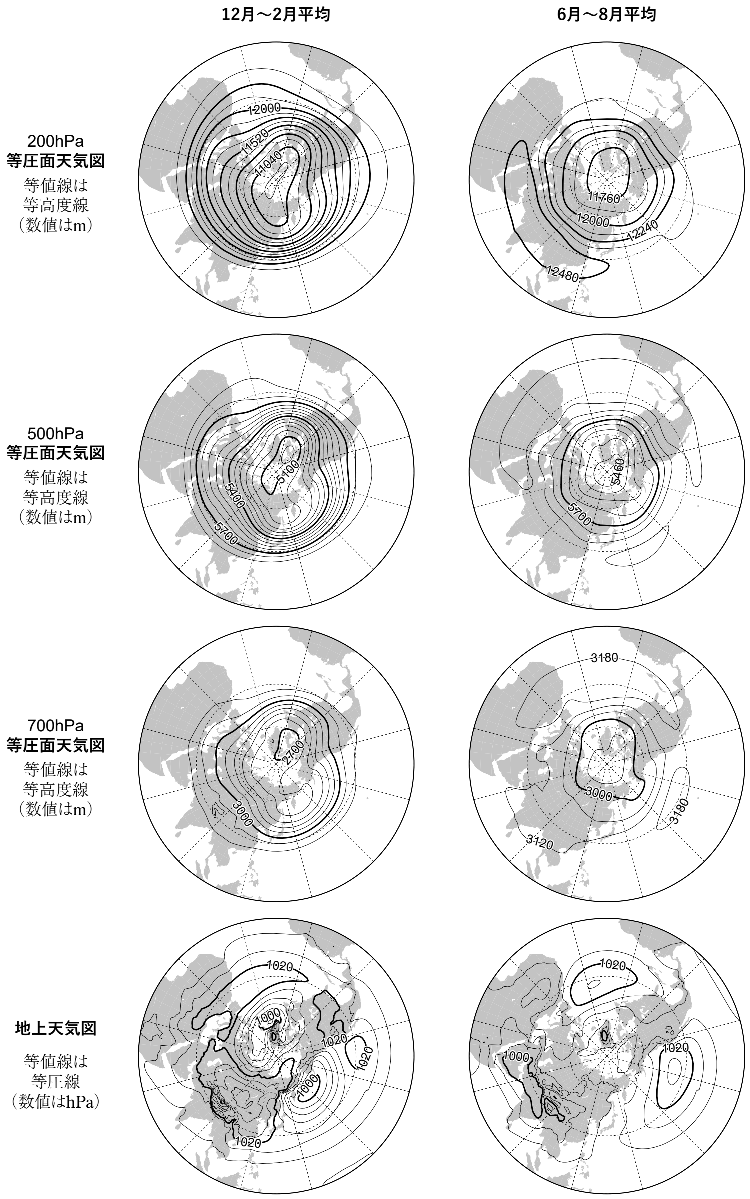
このような，地上天気図だけでなく，対流圏中層～上層の等圧面天気図でも確認できる高気圧を**背の高い高気圧**という。

まとめ

・冬の大陸の内陸部では地表面が＿＿＿＿＿によって極端な低温となり，それによって大気が冷却されることで対流圏下層では周囲より気圧が高くなる。
・亜熱帯の上空は＿＿＿＿＿＿＿のうち下降気流の領域となっているため，対流圏の下層から中層にかけては周囲より気圧が高くなる。
・地上の高気圧のうち，対流圏の中層～上層の等圧面天気図では確認できないものを＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿，確認できるものを＿＿＿＿＿＿＿＿＿という。

Chapter2　演習問題

次の図は，北半球の平年の天気図です。ここでは，この図を用いて高気圧について確認しましょう。



（データは気象庁による）

問題(1)　地上天気図の高気圧について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

　太平洋や大西洋の東部の北緯 30°付近には，冬と夏の両方について 1020hPa の閉じた等圧線が見られる。この高気圧は（熱帯収束帯 / 亜熱帯高圧帯）に対応し，（ハドレー循環 / ジェット気流）のうち下降気流の領域にあたる。

　また，夏のユーラシア大陸は地上天気図で低気圧となっているが，冬には逆に高気圧となっている。このように冬の大陸の内陸部では，地表が（季節風 / 放射冷却）によって強く冷却されるために高気圧が優勢となる。北米大陸も，夏には閉じた等圧線が見られないものの低圧部となっており，冬にはユーラシア大陸と同様に高気圧となっている。

問題(2)　高気圧の鉛直構造について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

　夏の地上天気図で高気圧が見られる太平洋や大西洋の東部の北緯 30°付近は，700hPa や 500hPa の等圧面天気図でも高気圧になっている。つまり，これらの高気圧は地表から少なくとも（3 ~ 5km / 30 ~ 50km）の高度まで続くような背の高い高気圧である。

　それに対して，冬の地上天気図で優勢な高気圧が見られるユーラシア大陸上空には，いずれの等圧面天気図でも高気圧が確認できない。つまり，この高気圧は地表から（1 ~ 2km / 10 ~ 20km）程度までに限られる，背の低い高気圧である。

第14講 PART9 確認問題

問1 次の文章を読み，下の問いに答えよ。

高気圧には季節や発生する場所により性質の異なる2種類が存在する。亜熱帯の上空は，（ ア ）の影響により，対流圏全体で下降気流が生じ，対流圏の下層から中層にかけては周囲より気圧が高くなる。この高気圧を（ イ ）という。

冬の大陸内陸部では，（ ウ ）の影響により対流圏下層で下降気流が生じ，周囲より気圧が高くなる。この高気圧を（ エ ）という。

(1) 空欄ア，イに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① ア：ハドレー循環　イ：背の高い高気圧
② ア：ハドレー循環　イ：背の低い高気圧
③ ア：放射冷却　イ：背の高い高気圧
④ ア：放射冷却　イ：背の低い高気圧

(2) 空欄ウ，エに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① ウ：ハドレー循環　エ：背の高い高気圧
② ウ：ハドレー循環　エ：背の低い高気圧
③ ウ：放射冷却　エ：背の高い高気圧
④ ウ：放射冷却　エ：背の低い高気圧

⑶　2 種類の高気圧に関する記述として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ともに地上天気図では確認できない。

②　背の低い高気圧は，対流圏中層～上層の等圧面天気図で確認できる。

③　背の高い高気圧は，対流圏中層～上層の等圧面天気図で確認できる。

④　ともに対流圏中層～上層の等圧面天気図では確認できない。

第 15 講　海洋
PART1 海流

目標　環流の成因と，その流れの特徴について説明できる。

Chapter1　エクマン輸送と地衡流

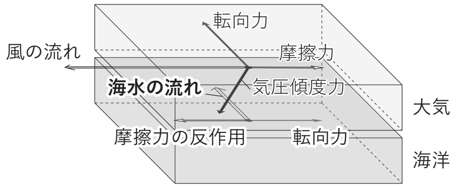
地学基礎では，赤道から亜熱帯にかけての海域に環流が存在することを学んでいます。ここでは，環流の成因について学びましょう。

エクマン輸送と海面高度

・エクマン輸送

海面上を吹く風には，海面による摩擦力がはたらく。同時に，海面付近の海水には，摩擦力の反作用と転向力がつり合うような流れが生じる。この流れを**エクマン輸送**といい，風の流れから見て北半球では直角（右向き / 左向き）である。エクマン輸送が生じるのは海面から深さ数十 m 程度までの部分に限られ，この部分をエクマン境界層という。

知っておこう
海面直下の水は，風の流れから見て 45° 右向き（北半球の場合）に流れます。そこから深くなるにつれて，流速が小さくなるとともに流れの向きが右向きにずれていきます。左の説明にあるエクマン輸送は，それをエクマン境界層全体で足し合わせたものだと言えます。



・亜熱帯海域の海面高度

	大気の大循環の風	エクマン輸送
低緯度	（東より / 西より）	（極向き / 赤道向き）
中緯度	（東より / 西より）	（極向き / 赤道向き）

→エクマン輸送の結果として，大洋の亜熱帯海域では海面が周囲より 1 ~ 2m 程度（高く / 低く）なる。

地衡流と環流

・**地衡流**

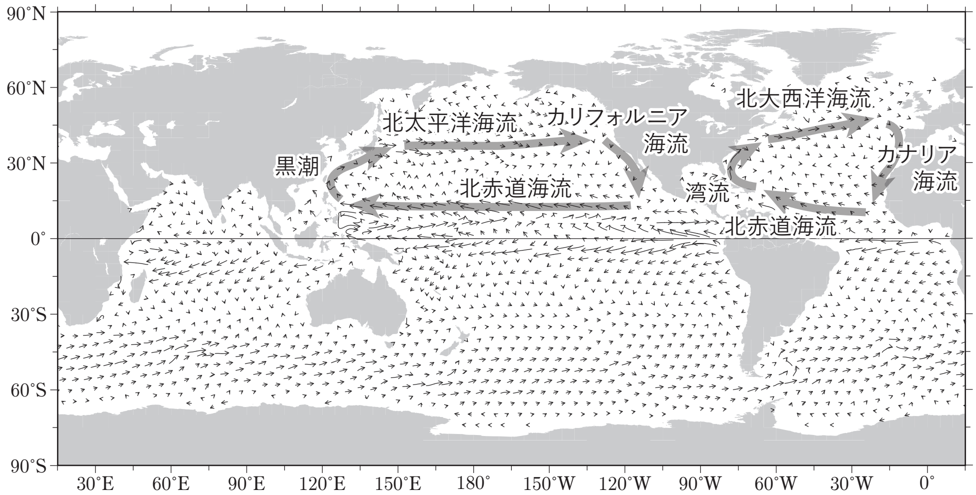
　海面の傾きは圧力の傾きを生じるため，海面が高い側から低い側へと力がはたらく。単位距離あたりの圧力差を圧力傾度といい，圧力傾度による力を圧力傾度力という。水塊にはたらく圧力傾度力と転向力がつり合った流れを**地衡流**といい，大規模な海流のほとんどは地衡流とみなすことができる。

知っておこう
圧力傾度，圧力傾度力，地衡流は，空気塊の運動を考えたときの気圧傾度，気圧傾度力，地衡風にそれぞれ対応します。原理は同じなので，必要に応じて復習してみてください。

・**環流**

　大洋の亜熱帯では周囲より海面が（高い / 低い）。そのため，そのまわりの地衡流は北半球では（時計回り / 反時計回り），南半球では（時計回り / 反時計回り）に流れる。この流れを**環流**という。環流は，深さ数百 m 程度までの海水の流れである。

覚えておこう
南半球では流れの向きと転向力の向きとの関係が北半球とは逆向きになるため，環流の流れも逆回りになります。



まとめ

・北半球で海面上を風が吹くと，海面付近の海水には風の流れから見て直角____向きの流れが生じる。
・この流れを________といい，その影響で亜熱帯海域では海面が周囲より_____くなる。
・海面の傾きによって生じる圧力傾度力と______がつり合った流れを地衡流という。
・海面の傾きが原因となって大洋の亜熱帯のまわりを周回する地衡流が生じ，この流れを_______という。

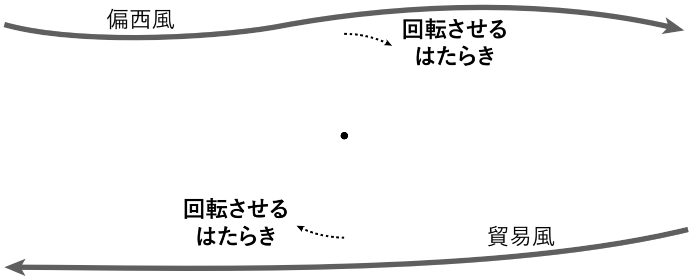
Chapter2　環流の特徴

環流は，低緯度から中緯度にかけての大規模な水平循環です。ここでは，この循環の特徴について学びましょう。なお，Chapter2 では特に断らない限り北半球について考えます。

西岸強化

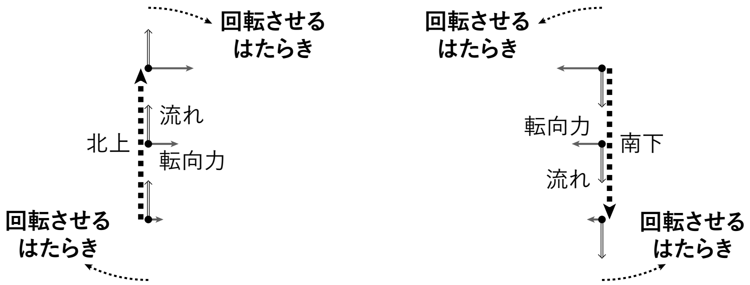
・風による回転

低緯度では（東より / 西より），中緯度では（東より / 西より）の風が吹き，これらは水塊を（時計 / 反時計）回りに回転させるはたらきをもつ。



・転向力の緯度による違いと回転

	北上	南下
転向力の大きさ	（増加 / 減少）	（増加 / 減少）
回転させるはたらき	（時計 / 反時計）回り	（時計 / 反時計）回り



→水塊が（北上 / 南下）すれば，この回転が風による回転とつり合うことができる。

→大洋のほとんどではそのような流れが生じるとしても，同じ量の水をどこかで逆向きに戻す必要がある。

・**西岸強化**

南北半球を問わず，大洋の亜熱帯のほとんどには（高緯度 / 低緯度）向きの弱い流れが存在し，西岸の幅 100km 程度の領域のみに（高緯度 / 低緯度）向きの強い流れが見られる。このように，大洋のうち西岸で環流が強められることを**西岸強化**という。

<u>西岸強化を受けている海流の例：</u>

北太平洋……（カリフォルニア海流 / 黒潮）

北大西洋……（北大西洋海流 / 湾流）

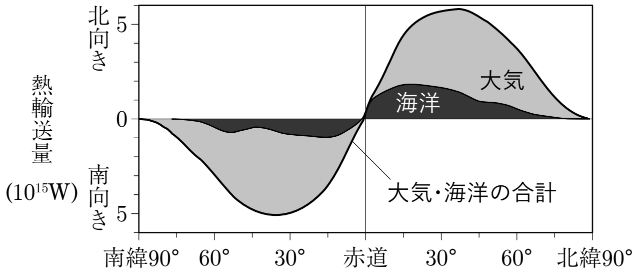
知っておこう

西岸における北向きの流れでは，水塊を回転させるはたらきが風による回転とつり合いません。西岸の流れの中では摩擦力の影響で流速が東側ほど大きいため，水塊を反時計回りに回転させるはたらきが生じてつり合いが取れるのです。

環流と南北熱輸送

・**海洋による南北熱輸送**

南北半球を問わず，環流は温かい水を中緯度側へ，冷たい水を低緯度側へと運んでいる。これらは，いずれも（低緯度側から中緯度側 / 中緯度側から低緯度側）への熱輸送に対応する。



まとめ

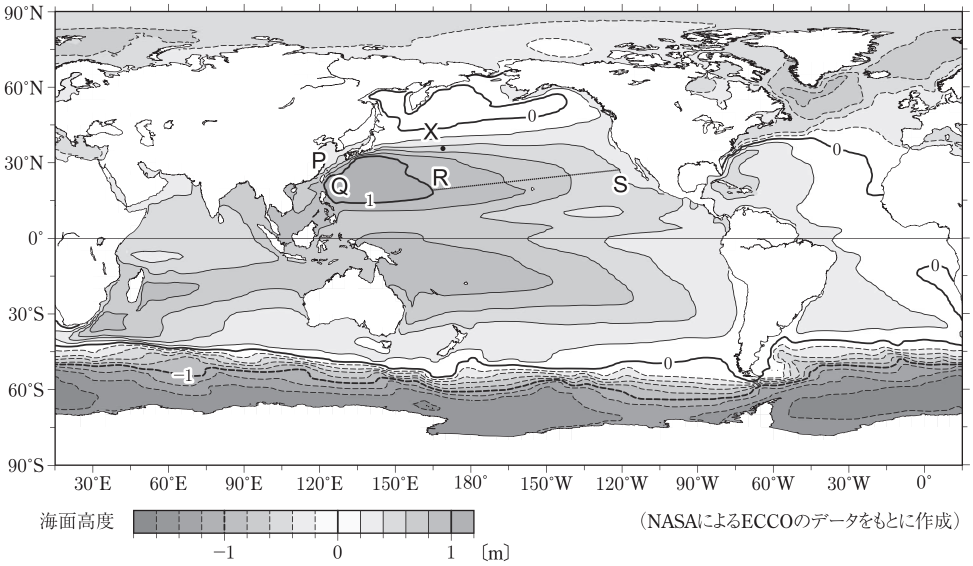
・南北半球を問わず環流は大洋の西岸において強められており，このことを＿＿＿＿＿＿という。

・環流のうち強い流れの例として，北太平洋の＿＿＿＿や，北大西洋の＿＿＿＿が挙げられる。

・環流は，低緯度から中緯度に向かう南北熱輸送を担っている。

Chapter3　演習問題

次の図は，2001年から2010年までを平均した海面高度の分布を示したものです。ここでは，この図を用いて海流について確認しましょう。



（NASAによるECCOのデータをもとに作成）

問題(1)　北太平洋の環流について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

図のX地点を流れる地衡流の力のつり合いを考えると，圧力傾度力が（北向き / 南向き），転向力が（北向き / 南向き）であり，流れの向きは（北向き / 東向き / 南向き / 西向き）である。

また，海面高度0.4mの等高度線から1.0mの等高度線までの距離を比較すると，図のP－Qではほぼ同じ緯度にあるR－Sのおよそ20分の1である。よって，単位質量の水塊について考えたとき，P－Qを横切る地衡流は，R－Sを横切る地衡流とくらべて圧力傾度力と転向力の大きさがおよそ（400分の1 / 20分の1 / 20倍 / 400倍），であり，流速がおよそ（400分の1 / 20分の1 / 20倍 / 400倍）だといえる。

実際に，北太平洋を南向きに流れる（北太平洋海流 / カリフォルニア海流）の流速は最大でも数十 cm/s だが，北向きに流れる（黒潮 / 親潮）の流速は最大で 2m/s 程度に達する。

問題⑵ 南半球の海流について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

北極の上空から見ると，地球は（時計回り / 反時計回り）に自転しているように見える。しかし，南極の上空から見ると，地球は（時計回り / 反時計回り）に自転しているように見える。そのため，自転による見かけの力である転向力は北半球と南半球で逆向きにはたらく。

海面高度の分布を見ると，南緯およそ 45° より南側では多くの等高度線が東西方向に地球を周回している。地衡流の力のつり合いを考えることで，この海域では南極のまわりを（西から東 / 東から西）へと周回する海流が流れていると推定できる。これは南極大陸が孤立していることで生じる南極環流であり，（三畳紀 / 古第三紀）に形成されたと考えられている。

知っておこう

南極環流にも環流という名前がついていて，亜熱帯のまわりの循環と少し紛らわしいですね。このような他の循環と区別するために，亜熱帯のまわりの循環は亜熱帯環流と呼ばれることがあります。

第15講　PART1　確認問題

問１　次の文章を読み，下の問いに答えよ。

海面上を吹く風には，海面から（　ア　）がはたらくので，同時に，海面付近の海水には，この（　ア　）の反作用と（　イ　）がつり合うような流れが生じる。この流れをエクマン輸送といい，その向きは，北半球では，風の流れの向きに対して（　ウ　）である。エクマン輸送の結果として，大洋の（　エ　）では，海面が周囲より 1 ～ 2m 程度高くなる。この海面の高度差によって生じる圧力傾度力と（　イ　）がつり合うような流れを（　オ　）といい，北半球では（　カ　）に流れる。

(1)　空欄ア，イに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ア：摩擦力　　イ：転向力
②　ア：摩擦力　　イ：重力
③　ア：転向力　　イ：摩擦力
④　ア：転向力　　イ：重力

(2)　空欄ウ，エに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ウ：直角左向き　　エ：赤道海域
②　ウ：直角左向き　　エ：亜熱帯海域
③　ウ：直角右向き　　エ：赤道海域
④　ウ：直角右向き　　エ：亜熱帯海域

⑶　空欄オ，カに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　オ：深層循環　　カ：時計回り

②　オ：深層循環　　カ：反時計回り

③　オ：地衡流　　カ：時計回り

④　オ：地衡流　　カ：反時計回り

問２　次の問いに答えよ。

⑴　北太平洋において西岸強化を受けている海流として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　北太平洋海流　　②　黒潮

③　カリフォルニア海流　　④　湾流

⑵　環流による南北熱輸送の説明として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　低緯度側から中緯度側への熱輸送である。

②　中緯度側から低緯度側への熱輸送である。

③　中緯度側から高緯度側への熱輸送である。

④　高緯度側から中緯度側への熱輸送である。

PART2 熱塩循環と海水の鉛直構造

目標 熱塩循環の原理と，海水の鉛直構造の特徴について説明することができる。

Chapter1　熱塩循環と海水の鉛直構造

地学基礎でも学んだように，海洋は層構造をなしています。ここでは，海洋の鉛直断面について学びましょう。

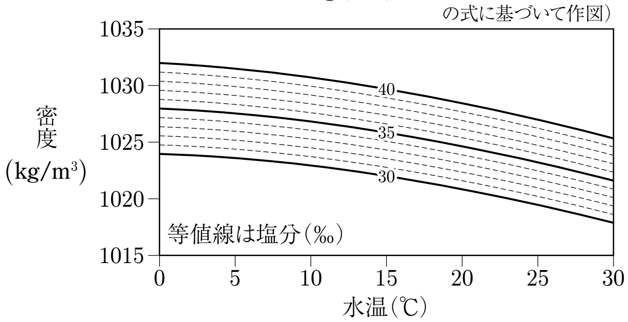
海水の水温と塩分の分布

・海水の塩分

海水には，塩化ナトリウムをはじめとする塩類が溶けている。その割合は海水 1kg あたり約（35g / 3.5g）であり，これは千分率〔‰（パーミル）〕を用いて 35‰と表される。

・海水の密度

（Millero and Huang (2009) と Jones and Harris (1992) の式に基づいて作図）



→海水の密度は, 水温が（高い / 低い）ほど, また塩分が（高い / 低い）ほど大きい。

・熱塩循環

グリーンランド沖や南極大陸周辺では，大気による冷却で水温が低くなったり，結氷により塩分が高くなったりすることで表層の海水の密度が大きくなる。密度の大きな海水は沈み込み，海洋の鉛直方向の循環を引き起こす。この循環を**熱塩循環**という。

知っておこう

海水が凍るとき，氷の中には塩類が含まれにくく，海水中に塩類が取り残されます。その結果として，海水の塩分が大きくなるのです。

・**海洋の南北断面〔大西洋の例〕**

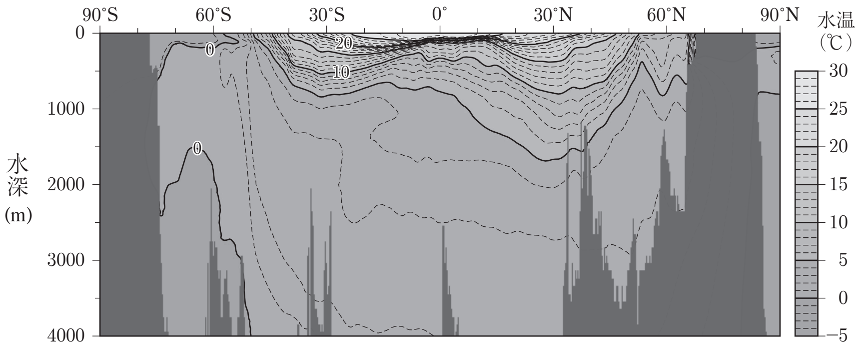
水深が約1500mより大きな部分では海域による水温や塩分の違いが小さく，この部分を**深層**という。深層の海水が海域によらず比較的均質なのは，熱塩循環の一部として深層の海水が広範囲をゆっくりと循環しているからである。

また，南北半球の高緯度には塩分や水温が深さによらずほぼ一定となっている部分があり，ここでは鉛直方向の水の運動が起こっている。

覚えておこう

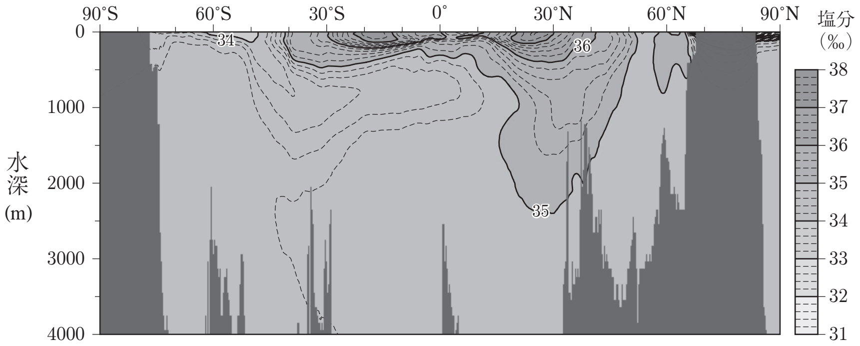
深層の海水の循環を深層循環といいます。これにより，深層の海水は1000～2000年をかけて世界中の深海をめぐっています。

水温



（NOAAによる World Ocean Atlas 2023 のデータをもとに作成）

塩分



（NOAAによる World Ocean Atlas 2023 のデータをもとに作成）

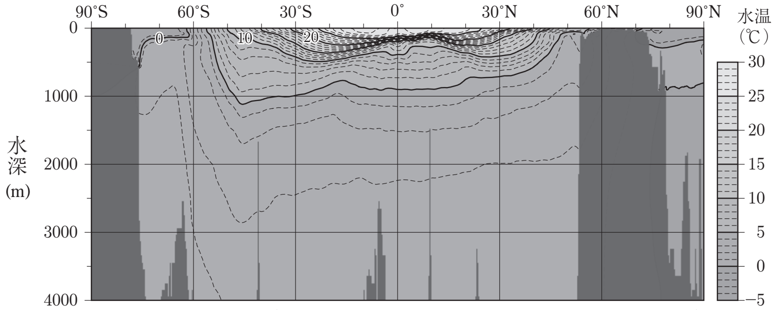
まとめ

・海水の密度は，水温が＿＿＿，塩分が＿＿＿ほど大きい。
・グリーンランド沖や南極大陸周辺では，大気による冷却で水温が低くなることや，＿＿＿＿によって塩分が高くなることで海水の密度が＿＿＿＿＿なる。
・このような水温と塩分の違いによって生じる海洋の鉛直方向の循環を＿＿＿＿＿＿＿といい，その結果として深層の海水は海域によらずほぼ均質となっている。

Chapter2　演習問題

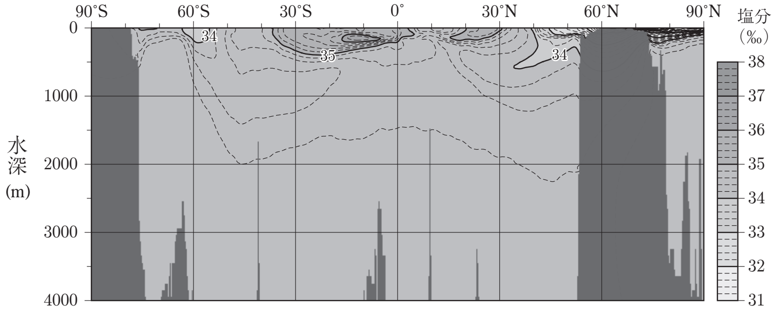
次の図は，太平洋の南北断面における水温と塩分を示した図です。ここでは，この図を用いて海洋の鉛直構造について確認しましょう。

水温



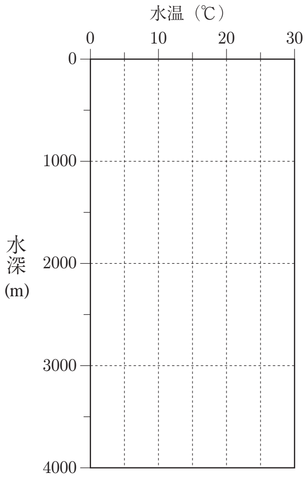
（NOAAによる World Ocean Atlas 2023 のデータをもとに作成）

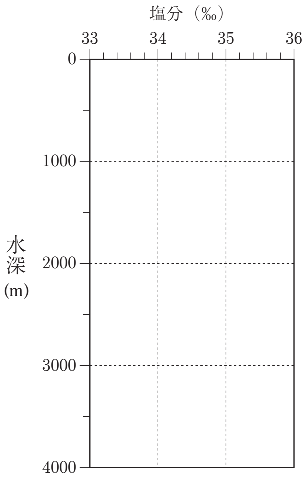
塩分



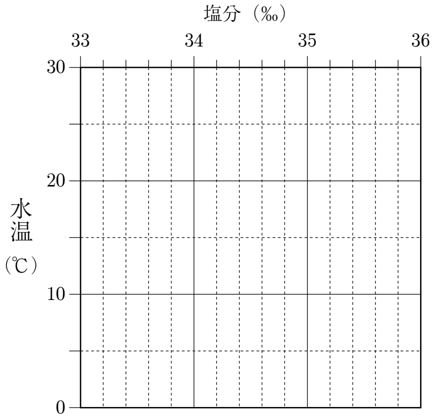
（NOAAによる World Ocean Atlas 2023 のデータをもとに作成）

問題⑴　上の図をもとにして，赤道，南緯 30°，南緯 60° における水温と塩分の鉛直分布を，次のグラフ上に描きましょう。それぞれの地点における曲線は，色または線種を変えて区別できるようにしてください。





問題⑵　問題⑴の結果を参考にして，赤道，南緯30°，南緯60°の海面から深さ4000mまでにおける水温と塩分の関係を次の図中に描きましょう。ただし，海面から水深1000mごとに点を打ち，それらをもとに曲線を描いてください。



問題⑶　太平洋の海洋の鉛直断面について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

海面付近の水温は，南北半球ともに赤道付近で最も高く，極に近づくにつれて低くなっている。一方，海面付近の塩分は北緯0°～北緯20°を中心として，その両側で一度（高く ／ 低く）なり，緯度60°前後の高緯度で（高く ／ 低く）なっている。これは，赤道のやや北側や緯度60°前後の高緯度では降水量が蒸発量よりも（多く ／ 少なく），その間の亜熱帯では降水量が蒸発量よりも（多い ／ 少ない）ことに対応している。

また，赤道から中緯度にかけての水深1000m付近には，表層とくらべて塩分の（高い ／ 低い）海水が分布している。このような海水は塩分だけから考えると表層よりも密度が（大きい ／ 小さい）が，実際には水温が表層よりも（高い ／ 低い）ことから表層よりも密度が（大きく ／ 小さく）なっている。

さらに，水深が3000mより大きな部分の海水の性質は緯度によらずほぼ等しく，これは深層循環の結果だと考えられる。

第15講 PART2　確認問題

問１　海水の塩分と密度について，次の問いに答えよ。

(1)　海水の塩分は何‰か。最も適当な数値を，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　0.35‰　　②　3.5‰　　③　35‰　　④　350‰

(2)　海水の密度と水温・塩分の関係について最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　水温が高いほど，塩分が高いほど，密度は大きくなる。

②　水温が高いほど，塩分が低いほど，密度は大きくなる。

③　水温が低いほど，塩分が高いほど，密度は大きくなる。

④　水温が低いほど，塩分が低いほど，密度は大きくなる。

問２　次の文章を読み，下の問いに答えよ。

地球の南北半球の高緯度地域では，水温が低くなったり結氷により塩分が高くなったりすることで，表層の海水の密度が大きくなる。密度の大きな海水は沈み込むので，鉛直方向の循環を引き起こす。この循環を（　ア　）という。

水深が約 1500m より大きな深層では，（　ア　）の一部として，海水が広範囲をゆっくりと循環している。この循環を（　イ　）といい，（　ウ　）年をかけて世界中の深海をめぐっている。

(1)　空欄ア～ウに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ア：熱塩循環　　イ：深層循環　　ウ：1000 ～ 2000

②　ア：熱塩循環　　イ：深層循環　　ウ：10000 ～ 20000

③　ア：深層循環　　イ：熱塩循環　　ウ：1000 ～ 2000

④　ア：深層循環　　イ：熱塩循環　　ウ：10000 ～ 20000

⑵ （　イ　）の結果として，深層の海水の性質にはどのような特徴があるか。最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① 低緯度ほど水温や塩分が高い。

② 中緯度付近で水温や塩分が最も高い。

③ 高緯度ほど水温や塩分が高い。

④ 緯度によらず水温や塩分はほぼ等しい。

PART3 波

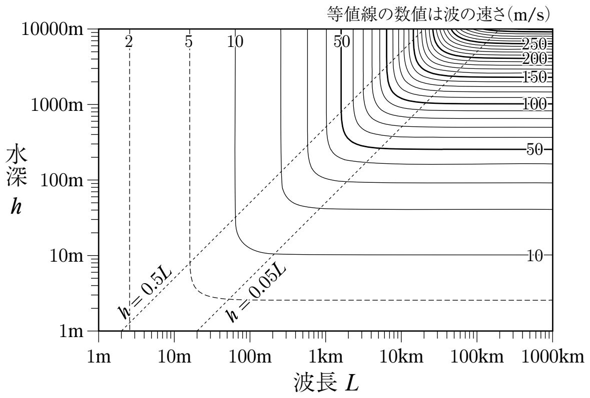
目標　風浪，うねり，津波とは何か，それぞれ説明することができる。

Chapter1　波

海面には波が生じますが，その形や高さはさまざまです。ここでは，波の分類やそれぞれの波の性質について学びましょう。

波の速さ

・**波の速さ**



・**表面波**

水深が波長の 0.5 倍より大きな波，すなわち波長が水深の 2 倍より（長い / 短い）波を**表面波**という。表面波の速さは（波長 / 水深）によらず一定で，（波長 / 水深）の平方根に比例する。

・**長波**

水深が波長の 0.05 倍より小さな波，すなわち波長が水深の 20 倍より（長い / 短い）波を**長波**という。長波の速さは（波長 / 水深）によらず一定で，（波長 / 水深）の平方根に比例する。

成因による波の分類

・**風浪**

風の力をその場で受けることによって海面に生じる波を**風浪**という。風浪は不規則でとがった波であり，風の強さや風を受け続ける時間と距離に応じて波長や波高が大きくなる。波長は最大で（数百 m / 数百 km）程度であり，基本的に（表面波 / 長波）として伝わる。

・**うねり**

強い風によって風浪が形成された後，海面が強い風の影響を受けなくなると，波のうち波長の（長い / 短い）成分だけが丸みを帯びながら数百 km ～ 1000km 以上の遠方まで伝わる。この波を**うねり**といい，風浪と同様に（表面波 / 長波）として伝わる。

・**津波**

海底直下の断層運動によって海底面が急激に動くと，海底から海面までの海水が動いて波が発生することがある。この波を**津波**という。波長は最大で（数百 m / 数百 km）に達し，基本的に（表面波 / 長波）として伝わる。

まとめ

・風の力をその場で受けて生じる不規則な波を＿＿＿＿といい，基本的に＿＿＿＿として伝わる。
・風の力によって生じた波のうち波長の＿＿＿＿成分だけが伝わったものを＿＿＿＿といい，基本的に＿＿＿＿として伝わる。
・海底直下の断層運動により海底面および海水が動いて生じる波を＿＿＿＿といい，基本的に＿＿＿＿として伝わる。

Chapter2　演習問題

ここでは，波の伝わり方について確認しましょう。ただし，以下では円周率を$\pi=3.1$，重力加速度を$g=9.8\text{m/s}^2$，海の水深をD，波の波長をL，波の速さをvとします。

問題(1)　風浪とうねりについて述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

風の力をその場で受けることによって海面に生じる波を風浪という。風浪にはさまざまな波長のものがあるが，典型的な波長は（数 cm～数百 cm ／ 数 m～数百 m ／ 数 km～数百 km）程度である。この値は，一般的な海洋の水深とくらべて（大きい ／ 小さい）。そのため，風浪は（表面波 ／ 長波）として伝わり，

$$v=\sqrt{\frac{gL}{2\pi}} \quad \cdots\cdots①$$

と表せる。

①式からわかるように，さまざまな波長の風浪が同時に発生したとき，発生した場所から離れるにつれて，波長の（長い ／ 短い）成分が先に進むようになる。さらに，波長の長い波は波長の短い波より減衰しにくいため，遠方まで伝わりやすい。

これらのことから，風浪の発生した場所から離れた場所まで伝わる波は波長が数百 m 程度であり，この波がうねりである。

①式をもとに計算すると，波長 140m のうねりの速さはおよそ秒速（15 ／ 50 ／ 150）m，すなわち時速（54 ／ 180 ／ 540）km である。よって，このようなうねりが日本列島から 2500km 離れた台風によって生じたとすると，日本列島までおよそ（1 日 ／ 2 日 ／ 1 週間）で到達する。

問題⑵　津波について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

　海底直下の断層運動によって海底面が急激に動くと，海底から海面までの海水が動いて波が発生することがある。これによって生じる波を津波という。津波の波長は（数十 cm～数百 cm ／ 数十 m～数百 m ／ 数十 km～数百 km）程度であり，この値は，一般的な海洋の水深とくらべて十分（大きい ／ 小さい）。そのため，津波は（表面波 ／ 長波）として伝わり，

$$v = \sqrt{gD} \qquad \cdots\cdots②$$

と表せる。

　②式をもとに計算すると，水深 4000m の海域を伝わる津波の速さはおよそ秒速（20 ／ 200 ／ 2000）m，すなわち時速（72 / 720 / 7200）km である。よって，このようなうねりが日本列島から 17000km 離れた地点の大地震によって生じたとすると，日本列島までおよそ（半日 ／ 1 日 ／ 1 週間）で到達する。

　また，②式からわかるように，津波は海岸に近づくと（速く ／ 遅く）伝わるようになる。これによって波は（高く ／ 低く）なり，やがてなだらかな波の形を保つことができなくなって砕ける。これを砕波といい，砕波は構造物への影響が大きいことが知られている。

第15講 PART3　確認問題

問１　次の表は表面波と長波の特徴をまとめたものである。空欄ア～エに入る語句の組合せとして最も適当なものを，下の①～④のうちから一つ選べ。

	波長	速さ
表面波	水深の２倍より（　ア　）	（　ウ　）の平方根に比例
長波	水深の２０倍より（　イ　）	（　エ　）の平方根に比例

①　ア：長い　イ：短い　ウ：波長　エ：水深
②　ア：長い　イ：短い　ウ：水深　エ：波長
③　ア：短い　イ：長い　ウ：波長　エ：水深
④　ア：短い　イ：長い　ウ：水深　エ：波長

問２　次の説明オ～キにあてはまる波の種類の組合せとして最も適当なものを，下の①～④のうちから一つ選べ。

（オ）海底直下の断層運動で海底面が急激に動き，海面までの海水が動いて発生する波
（カ）風の力をその場で受けることによって海面に生じる波
（キ）風の力によって生じた波のうち，波長の長い成分だけが丸みを帯びながら遠方まで伝わったもの

①　オ：風浪　カ：うねり　キ：津波
②　オ：津波　カ：風浪　キ：うねり
③　オ：うねり　カ：津波　キ：風浪
④　オ：津波　カ：うねり　キ：風浪

＜ Note ＞

PART4 潮汐

目標　満潮と干潮，大潮と小潮について，それぞれ説明することができる。

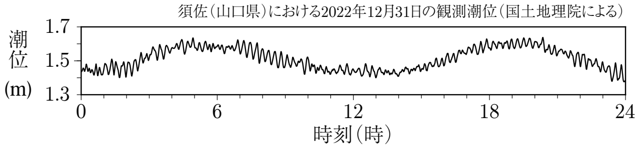
Chapter1　潮汐

風浪やうねりよりも周期の長い海面変動として，潮の満ち引きが挙げられます。ここでは, 潮汐について学びましょう。

潮汐

・潮汐とは

1 日に 1 ～ 2 回程度くり返される，潮位〔海面の高さ〕の周期的な変動を**潮汐**という。

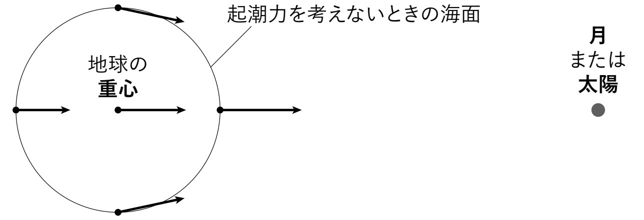


・起潮力

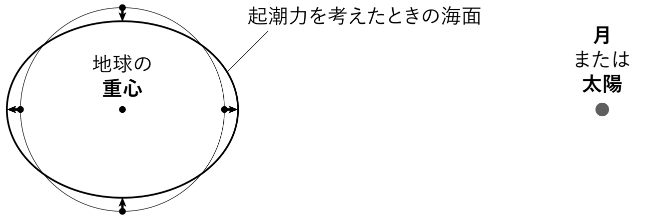
潮汐を引き起こす力を**起潮力**という。起潮力は月と太陽の万有引力によって生じ，月による起潮力は太陽による起潮力の約（2 倍 / 2 分の 1）である。

・起潮力の原理

各地点における万有引力



起潮力＝各地点における万有引力－地球の重心における万有引力



→起潮力は，月や太陽による万有引力の地表における大きさが地球の重心における大きさと異なることで生じる。

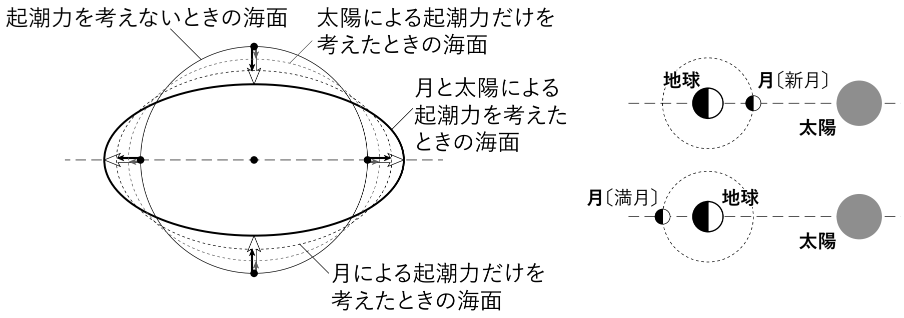
・**満潮と干潮**

潮汐のうち，潮位が極大となった状態を**満潮**，潮位が極小となった状態を**干潮**という。

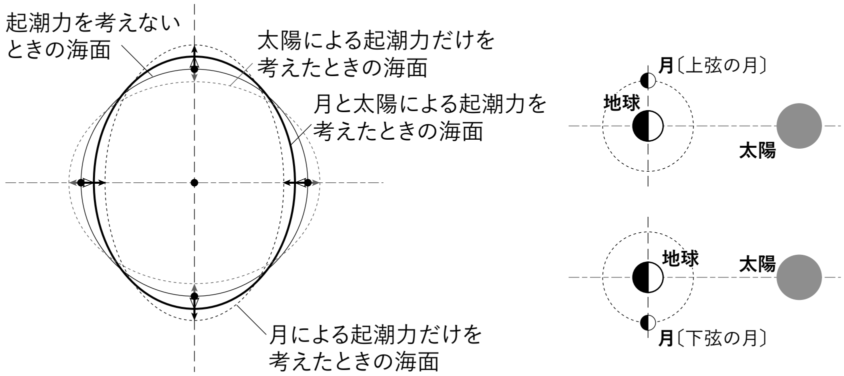
・**大潮と小潮**

満潮と干潮の潮位差が大きくなった状態を**大潮**，潮位差が小さくなった状態を**小潮**という。大潮は（新月や満月 / 上弦の月や下弦の月）の頃，小潮は（新月や満月 / 上弦の月や下弦の月）の頃にあたる。

地球・月・太陽が一直線上にあるとき



地球から見て月と太陽が垂直にずれた方向にあるとき



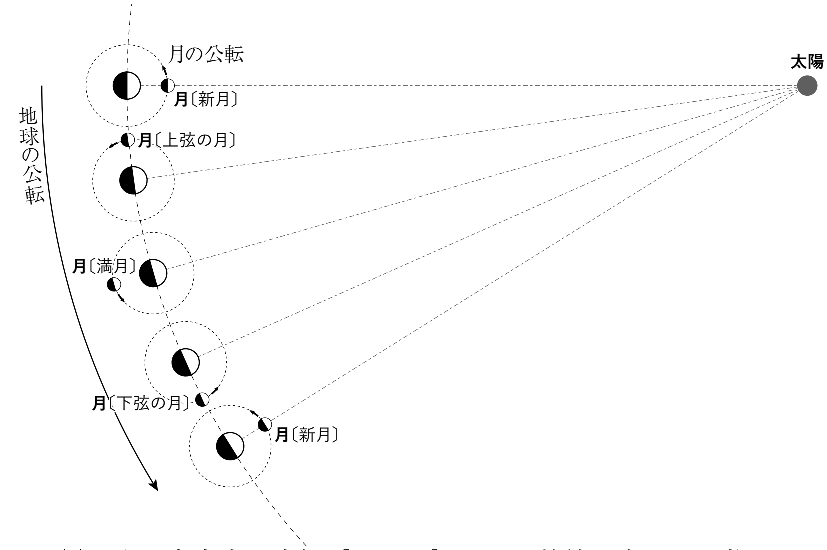
まとめ

・1日に1～2回程度の潮位の周期的な変動を＿＿＿といい，そのうち潮位の極大となった状態を＿＿＿，極小となった状態を＿＿＿という。

・満潮と干潮の潮位差の大きくなった状態を＿＿＿，小さくなった状態を＿＿＿という。

Chapter2　演習問題

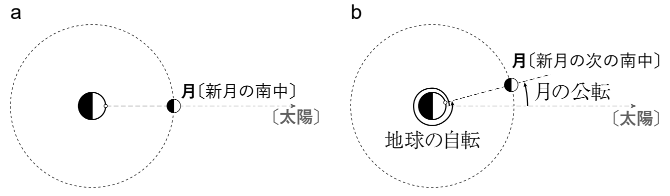
　次の図は，新月から次の新月までの地球と月の公転のようすを模式的に表しています。ここでは，この図を参考にしながら，潮汐の周期について確認していきましょう。



問題(1)　次の文章中の空欄［　ア　］に入る数値を上から 3 桁の概数で答えましょう。

　新月から次の新月までは平均 29.5 日である。つまり，地球と太陽を結ぶ線を基準としたとき，月が地球のまわりを 1 周公転するのには約 29.5 日かかる。よって，地球と太陽を結ぶ線を基準としたとき，月の公転速度は 1 日あたり［　ア　］周である。

問題(2)　次の図は，新月が南中してから次に月が南中するまでの月の公転と地球の自転のようすを模式的に表しています。下の文章中の空欄［　イ　］～［　エ　］に入る数値をそれぞれ上から 3 桁の概数で答えましょう。



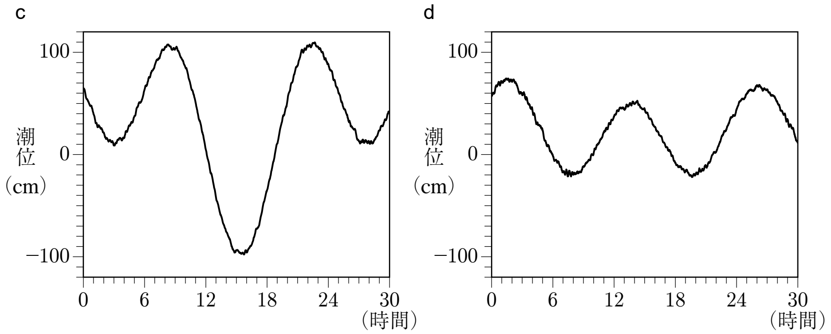
1 日とは地球上のある地点で太陽が南中してから次に南中するまでの時間である。つまり，地球と太陽を結ぶ線を基準としたとき，地球の自転速度は 1 日あたりちょうど 1 周である。

ここで, 図の a から b までの間に x 日が経過したとする。このとき，x 日間に地球の自転した角度〔周数〕は月の公転した角度〔周数〕よりもちょうど 1 周だけ大きいといえるので

1 周 / 日× x 日＝［　ア　］周 / 日× x 日 +1 周

が成り立ち，これを解くと x＝［　**イ**　］である。つまり，月が南中してから次に南中するまでの時間は約［　**ウ**　］時間であり，満潮から次の満潮までの時間は約［　**エ**　］時間だと考えられる。

問題⑶　次の図の c，d は，それぞれ同じ地点における隣り合う大潮と小潮のうちいずれかの頃に観測された 30 時間の潮位を示しています。この図に関連して述べた下の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。



大潮は満潮と干潮の潮位差が（大きく / 小さく）なった状態であり，（新月 / 満月 / 新月と満月）の頃にあたる。また，小潮は満潮と干潮の潮位差が（大きく / 小さく）なった状態であり，（上弦の月 / 下弦の月 / 上弦の月と下弦の月）の頃にあたる。

これらのことから考えると，c の図は（大潮 / 小潮）の頃の潮位を示している。また，c と d の期間は約（1 週間 / 半月 / 1 か月）離れている。

第15講 PART4　確認問題

問1　次の文章を読み，下の問いに答えよ。

潮汐は，１日に（　ア　）回程度くり返される潮位の周期的な変動である。潮汐の原因となる起潮力は，a月と太陽の万有引力によって生じる。

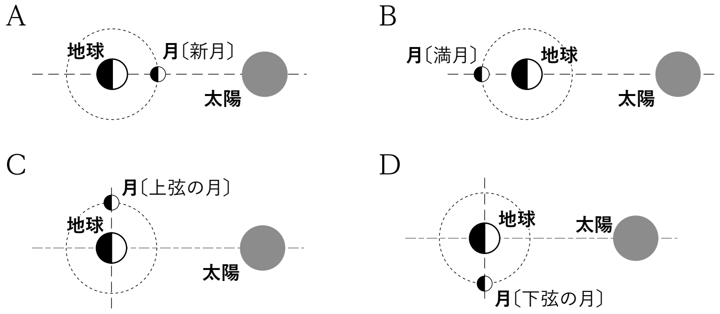
(1)　空欄アに入る数値として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　1～2　　②　5～6　　③　12～13　　④　24～25

(2)　下線部ａについて，月による起潮力と太陽による起潮力の大小関係として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　月による起潮力は太陽による起潮力の約６分の１である。
②　月による起潮力は太陽による起潮力の約２分の１である。
③　月による起潮力は太陽による起潮力の約２倍である。
④　月による起潮力は太陽による起潮力の約６倍である。

問２　次の図Ａ～Ｄは，地球・月・太陽の位置関係を模式的に表したものである。Ａ～Ｄのうち，大潮が起こるときを表しているのはどれか。最も適当な組合せを，下の①～④のうちから一つ選べ。



①　ＡとＢ　　②　ＡとＣ　　③　ＢとＤ　　④　ＣとＤ

第 16 講　大気・海洋の変動

PART1 対流圏と成層圏の変動

目標　エルニーニョ・南方振動，準 2 年周期変動，成層圏突然昇温とはどのような現象か，それぞれ説明できる。

Chapter1　赤道域の変動

赤道域の大気・海洋には，周期的な変動が知られています。ここでは，赤道域にみられるいくつかの変動について学びましょう。

海洋と対流圏の現象

・**エルニーニョ現象**　地学基礎

赤道太平洋東部の海水温が平均的な状態よりも（高く ／ 低く）なり，その状態が 1 年程度続く現象を**エルニーニョ現象**という。また，赤道太平洋東部の海水温が平均的な状態よりも（高く ／ 低く）なり，その状態が 1 年程度続く現象を**ラニーニャ現象**という。これらの現象は，ともに数年に 1 回程度発生する。

・**南方振動**

南太平洋低緯度域における海面気圧の平均的な状態からのずれに着目すると，西側で高いとき東側で（高く ／ 低く），西側で低いとき東側で（高い ／ 低い）傾向がある。このような大気の変動を**南方振動**という。

平均的な状態としては，この海域の海面気圧は西側より東側の方が（高い ／ 低い）。そのため，東西の海面気圧の平均的な状態からのずれは，東西方向の気圧傾度や貿易風と次のように対応する。

西側の海面気圧	高め	低め
東側の海面気圧	（高め ／ 低め）	（高め ／ 低め）
東西方向の気圧傾度	（大 ／ 小）	（大 ／ 小）
貿易風の風速	（大 ／ 小）	（大 ／ 小）

・**エルニーニョ・南方振動**

エルニーニョ現象は貿易風の（強い / 弱い）時期に対応し，これは東西の気圧差が（大きい / 小さい）時期にあたる。このように，海洋におけるエルニーニョ現象やラニーニャ現象と大気における南方振動は一連の現象と考えることができる。これを**エルニーニョ・南方振動**といい，この現象は赤道太平洋だけでなく日本列島を含む世界各地の気象と相関があることが知られている。

知っておこう

エルニーニョ・南方振動は英語で El Niño-Southern Oscillation といいます。これは ENSO と略され，日本語でも ENSO（エンソ）と呼ばれることがあります。

成層圏の現象

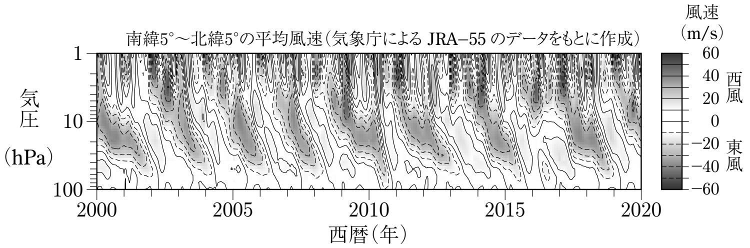
・**準 2 年周期変動**

赤道域の成層圏には，西風と東風が交互に現れる。この変動は，周期が 22 ～ 34 か月であり**準 2 年周期変動**と呼ばれている。

準 2 年周期変動は，赤道域の対流圏～中間圏の気象や，中高緯度の気象にも影響を与えている。

知っておこう

エルニーニョ・南方振動や準 2 年周期変動にみられるように，離れた地域の気象が相関をもつことをテレコネクションといいます。



覚えておこう

地表から見て上空に約 16km 上がるごとに，気圧は 10 分の 1 になります。つまり，左の図は高度およそ 16 ～ 48km にあたり，成層圏にほぼ対応するといえます。

まとめ

・赤道太平洋東部の水温が平均的な状態より高くなり，その状態が 1 年程度続く現象を＿＿＿＿＿＿＿という。
・南太平洋低緯度域における海面気圧の平均的な状態からのずれは東西で正負が逆になる傾向があり，このような振動を＿＿＿＿＿という。
・これらの現象をあわせて＿＿＿＿＿＿＿＿＿といい，世界各地の気象と相関があることが知られている。
・赤道域の成層圏において 22 ～ 34 か月程度の周期で西風と東風が交互に現れることを＿＿＿＿＿＿＿という。

Chapter2　中高緯度の変動

　中高緯度における大気の変動は，日本列島の天候に大きく影響します。ここでは，中高緯度の大気の特徴や，その変動の例について学びましょう。

成層圏の現象

・極渦

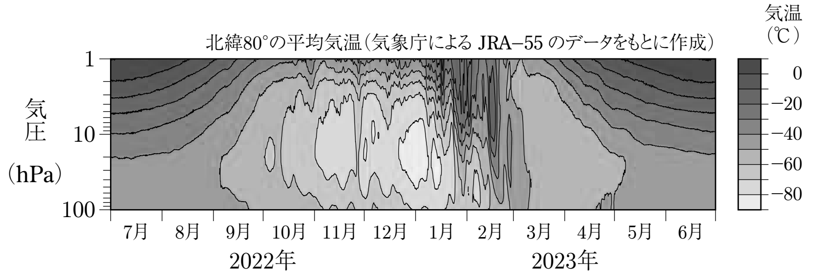
　冬の極域には太陽放射が入射しないため，極域の成層圏の大気は放射冷却によって著しく低温となる。これにより冬の極域は（高気圧 / 低気圧）となり，強い（西風 / 東風）が極のまわりを周回する。この渦を**極渦**といい，極側の空気と中緯度の空気のやり取りを妨げるはたらきをもつ。

・成層圏突然昇温

　冬の極域において，成層圏高緯度の気温が急上昇する現象を**成層圏突然昇温**という。

　対流圏の波動が成層圏に伝わった結果として成層圏上部で西風が弱められると，西風にはたらく（極向き / 赤道向き）の転向力が気圧傾度力とつり合わなくなり，（極向き / 赤道向き）の流れが生じる。この流れが極の上空で（上昇気流 / 下降気流）となり，断熱（膨張 / 圧縮）により昇温する。

　成層圏突然昇温は，地形が複雑で対流圏で大きな波動が形成されやすい（北半球 / 南半球）で頻繁に起こる。また，この現象は中高緯度の対流圏の気象や，エルニーニョ・南方振動や準２年周期変動といった赤道域の現象とも関連していると考えられている。



対流圏の現象

・北極振動

北半球中高緯度域における上空の等圧面高度の平均的な状態からのずれに着目すると，中緯度側で高いとき高緯度側で（高く ／ 低く），中緯度側で低いとき高緯度側で（高い ／ 低い）傾向がある。このような大気の変動を**北極振動**という。北極振動は基本的に対流圏にみられる現象だが，冬には成層圏にもみられる。

平均的な状態としては，この領域の上空の等圧面高度は中緯度側より高緯度側の方が（高い ／ 低い）。そのため，等圧面高度の平均的な状態からのずれは，南北方向の気圧傾度や偏西風の吹き方と次のように対応する。

中緯度側の等圧面高度	高め	低め
高緯度側の等圧面高度	（高め ／ 低め）	（高め ／ 低め）
南北方向の気圧傾度	（大 ／ 小）	（大 ／ 小）
偏西風の風速	（大 ／ 小）	（大 ／ 小）
偏西風の蛇行の振幅	（大 ／ 小）	（大 ／ 小）

知っておこう

偏西風の蛇行の振幅が大きいほど，極域の寒気が中緯度側に運ばれやすくなります。そのため，北極振動は中緯度の冬の気象に関係しています。

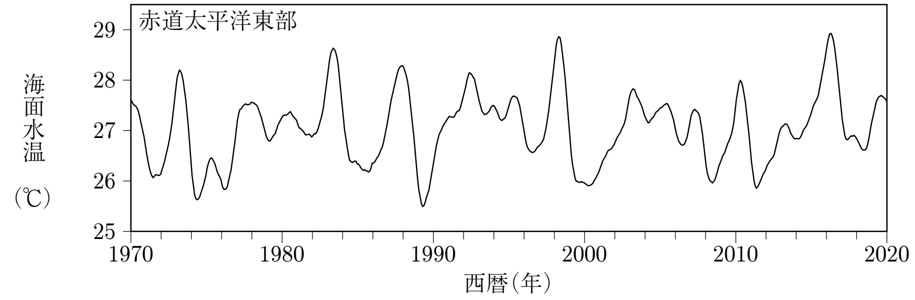
まとめ

- 成層圏の冬の極域は＿＿＿気圧となっており，そのまわりには＿＿＿＿＿＿と呼ばれる強い＿＿＿風が吹く。
- 冬の極域において，成層圏高緯度の気温が急上昇する現象を＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿という。
- 北半球中高緯度域における対流圏の等圧面高度の平均的な状態からのずれは南北で正負が逆になる傾向があり，このような振動を＿＿＿＿＿＿＿＿＿という。

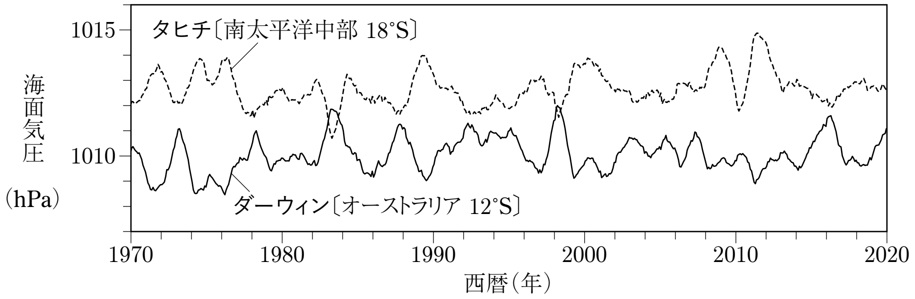
Chapter3　演習問題

　次の図は，1970年から2020年までの赤道太平洋東部における海面水温と，南太平洋中部のタヒチおよびオーストラリアのダーウィンにおける海面気圧の変動を示したものです。ここでは，この図を用いてエルニーニョ・南方振動について確認しましょう。ただし，いずれの値も直前12か月の平均値を示したものです。

（NCARによるデータをもとに作成）



（NCARによるデータをもとに作成）



問題(1)　赤道太平洋における海洋の平均的な状態について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

　図に示されている赤道太平洋東部の海面水温は平均するとおよそ27℃であり，この水温は赤道太平洋西部よりも（高い / 低い）。

　また，表層の海水は，エクマン輸送によって南北半球とも（赤道向き / 極向き）に輸送される。そのため，深層から冷水が湧昇し，赤道太平洋東部の海面水温は（高く / 低く）なっている。

問題⑵　赤道太平洋における大気の平均的な状態について述べた次の文章中の（　　）について, 正しいものを選びましょう。

平均的な状態で比較すると，南太平洋中部の低緯度にあたるタヒチの気圧は，西部のほぼ同じ緯度にあたるダーウィンの気圧よりもやや（高い / 低い）。この傾向は赤道太平洋でも同様であることが知られている。このような気圧の分布は，赤道太平洋（西部 / 東部）の海面水温が高く，積乱雲の発生などの対流活動が活発であることと対応している。

問題⑶　エルニーニョ・南方振動について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

図によると，タヒチの海面気圧が平均的な状態より高い時期にはダーウィンの海面気圧が平均的な状態より（高い / 低い）。また，タヒチの海面気圧が平均的な状態より低い時期にはダーウィンの海面気圧が平均的な状態より（高い / 低い）。さらに, 赤道太平洋東部の海面水温に着目すると, 2 地点の気圧差が大きな時期には（エルニーニョ / ラニーニャ）的, 気圧差が小さな時期には（エルニーニョ / ラニーニャ）的となる傾向がある。

これらのことは，東西方向の気圧傾度が大きいほど貿易風が（強く / 弱く），赤道太平洋西部の海面水温を（高く / 低く），また東西方向の気圧傾度を大きい状態に保ちやすいということから説明できる。つまり，エルニーニョ・南方振動は，大気と海洋が密接に相互作用することで現れる現象だといえる。

第16講　PART1　確認問題

問 1　次の文章を読み，下の問いに答えよ。

赤道域の大気・海洋にはさまざまな周期的変動が存在する。赤道太平洋で発生するのが a エルニーニョ現象・ラニーニャ現象であり，南太平洋の大気で発生するのが（　ア　）である。これらは一連の現象として捉えられており，（　イ　）とよばれる。また，赤道域の成層圏では（　ウ　）が，22 ～ 34 か月で入れ替わる準 2 年周期変動が発生している。

これらの現象は，b 離れた地域の気象に影響を与えている。

(1)　下線部 a について，この現象の説明として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　赤道太平洋東部の海水温が平常時より低くなる。
②　赤道太平洋東部の海水温が平常時より高くなる。
③　赤道太平洋西部の海水温が平常時より低くなる。
④　赤道太平洋西部の海水温が平常時より高くなる。

(2)　空欄アに入る語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　東方振動　　②　西方振動
③　南方振動　　④　北方振動

(3)　空欄イに入る語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ENSO　　②　SDGs　　③　VLBI　　④　GPS

(4)　空欄ウに入る語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　北風と南風　　②　西風と東風
③　高圧と低圧　　④　高温と低温

(5) 下線部ｂについて，離れた地域の気象が相関をもつことを表す語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① アイソスタシー　② プレートテクトニクス
③ エクマン輸送　④ テレコネクション

問２ 次の文章を読み，下の問いに答えよ。

中高緯度における大気の変動は互いに関連しあっており，日本の天候に大きな影響を与えている。

成層圏においては，冬の極域で発生する強い西風である（　エ　）や，対流圏の波動の影響で（　エ　）が弱まったときに起こる（　オ　）がある。

また，対流圏においては，c 北半球の高緯度側と中緯度側の気圧が連動しながら変動する北極振動があり，偏西風の蛇行に影響している。

(1) 空欄エ，オに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① エ：偏西風　オ：成層圏突然昇温
② エ：偏西風　オ：オゾンホール
③ エ：極渦　オ：成層圏突然昇温
④ エ：極渦　オ：オゾンホール

(2) 下線部ｃについて，高緯度側と中緯度側の気圧の高低と偏西風の蛇行の強さの組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① 高緯度側：高め　中緯度側：低め　偏西風の蛇行：強い
② 高緯度側：低め　中緯度側：高め　偏西風の蛇行：強い
③ 高緯度側：高め　中緯度側：高め　偏西風の蛇行：弱い
④ 高緯度側：低め　中緯度側：低め　偏西風の蛇行：弱い

PART2 大気による物質輸送

目標　オゾンホールが南極上空に形成されやすい理由について説明できる。

Chapter1　大気による物質輸送

　大気の循環は，さまざまな物質を輸送します。ここでは，オゾンホールの形成に関連する物質輸送について学びましょう。

オゾンホールの形成

・オゾンの生成

　オゾン〔O_3〕は,（O_2 ／ CO_2）の分子に（赤外線 / 紫外線）が作用することで生成される。オゾン生成が最もさかんな場所は，年間を通じて日射量の多い（低緯度 / 高緯度）地域の成層圏である。

・オゾン層と成層圏の気温分布

　成層圏の高度（20 ~ 30km / 40 ~ 50km）付近にはオゾン濃度が極大となる層が形成され，これを**オゾン層**という。

　オゾンは太陽からの紫外線を吸収して発熱する。ここで，成層圏のうち高度の高い場所ほど紫外線が（強い / 弱い）ことに加えて，大気の密度が（大きく / 小さく）温まりやすい。そのため，気温はオゾン層よりも上空にあたる高度（50km / 80km）付近で極大となる。

・成層圏の大気の循環とオゾン濃度

　成層圏には，（低緯度 / 高緯度）域で上昇し，（低緯度 / 高緯度）で下降する大規模な循環が存在する。オゾンはこの循環によって（低緯度から高緯度 / 高緯度から低緯度）へと輸送される。

覚えておこう

大気は気温分布をもとに４つの層に分けられており，それらの層の境界面は，下側の層の名前を用いて「〜圏界面」と呼ばれています。たとえば，左の本文にある気温が極大となる場所は成層圏と中間圏の境界面であり，**成層圏界面**と呼ばれます。

　なお，対流圏と成層圏の境界面である対流圏界面は，単に圏界面と呼ばれることもあります。

・オゾンホールの形成

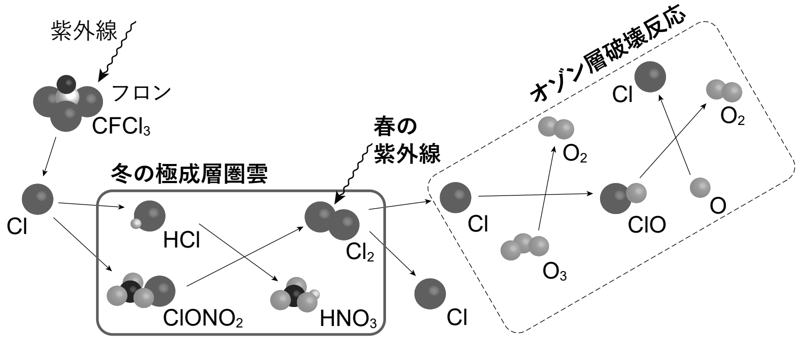
人間活動によって大気中に放出されたフロンも，オゾンと同様に成層圏の循環によって高緯度に輸送される。

冬の極成層圏雲に蓄積された（O_2 ／Cl_2）が春の（赤外線／紫外線）によって原子に分解されると，オゾン層の破壊が起こり，オゾンホールが形成される。極成層圏雲の形成には約－80℃という極めて低温の環境が必要であり，極渦が発達して低温が維持される南極上空では，極渦が不安定な北極上空よりもオゾンホールが形成されやすい。

知っておこう

極渦には，極域の低温を維持するだけでなく，低緯度側から極域への空気の流れを妨げるはたらきもあります。

春の極域でオゾンホールが形成された場合でも，極渦の消滅する夏には低緯度側からオゾンを含む空気が流入し，オゾンホールも消滅します。

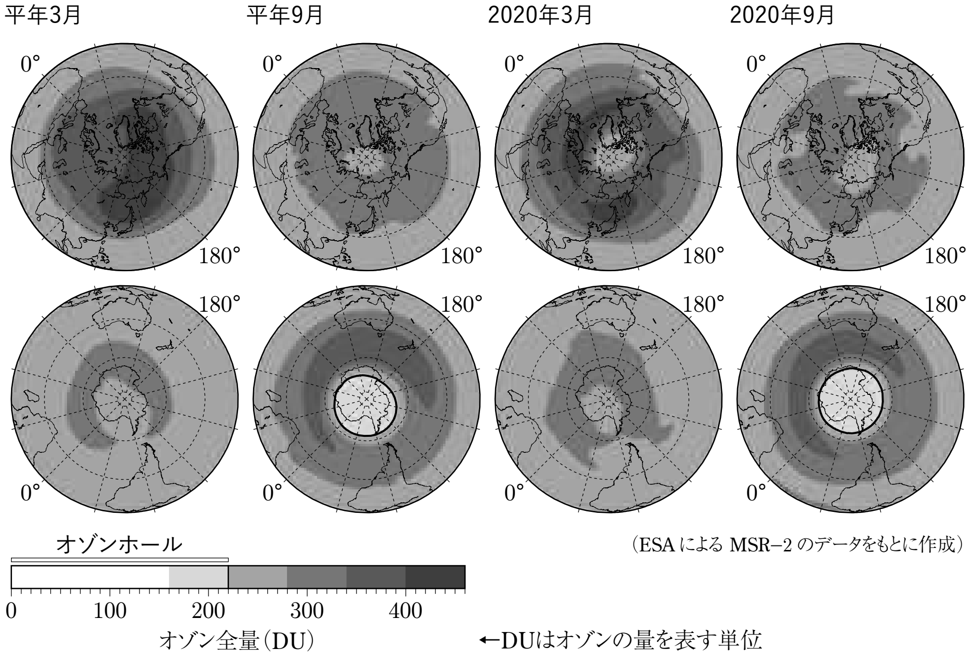


まとめ

- 成層圏には＿＿緯度で上昇して＿＿緯度で下降する大規模な循環が存在し，オゾンやフロンはこの循環によって南北方向に輸送される。
- 冬の＿＿＿＿＿＿＿＿に蓄積された＿＿＿の分子が春の紫外線によって原子に分解されると，オゾン層が破壊されてオゾンホールが形成される。
- 南極上空は北極上空より冬に低温となるため，極成層圏雲およびオゾンホールが形成されやすい。

Chapter2　演習問題

次の図は，北半球と南半球のオゾン全量〔大気中のオゾンの総量〕を示しています。ここでは，オゾンホールについて確認していきましょう。



（ESA による MSR−2 のデータをもとに作成）

←DUはオゾンの量を表す単位

問題(1)　極域のオゾン全量について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

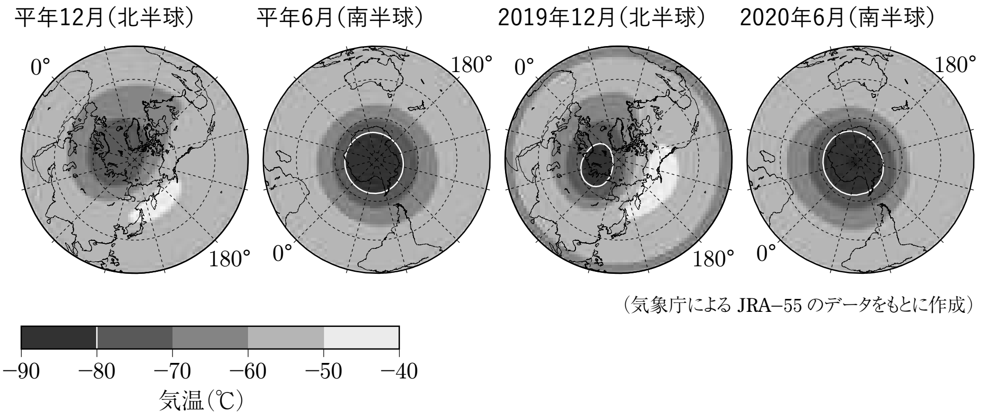
平年のオゾン全量は，南半球の（春 / 秋）にあたる９月の南極付近において，オゾンホールの基準となる 220DU を下回っている。また，同じ領域でも３月にはオゾン全量が大きくなっており，（春 / 秋）にはオゾンホールが消滅しているといえる。

2020 年を平年と比較すると，北半球の（春 / 秋）にあたる３月の北極付近において，オゾンホールの基準となる 220DU は上回っているものの，オゾン全量がかなり少なくなっていることがわかる。

問題⑵　オゾン全量の分布について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

極付近を除けば，オゾン全量は低緯度より中緯度～高緯度の方が(多い / 少ない)。オゾンの生成がさかんなのは(低緯度 / 高緯度）なので，オゾンは大気の循環によって（低緯度から高緯度 / 高緯度から低緯度）へと輸送されていると予想される。

問題⑶　次の図は，30hPa 等圧面の気温を示しています。この図を参考にして，オゾンホールについて述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。



（気象庁による JRA–55 のデータをもとに作成）

平年の図で見ると，30hPa 等圧面における冬の気温が極成層圏雲の形成される目安である約−80℃を下回るのは，(北極 / 南極）周辺の領域に限られる。これは，大陸配置の単純な（北半球 / 南半球）の方が極渦が安定的に存在し，その内部の気温が低くなりやすいためである。

オゾンホールは，極成層圏雲に蓄積された（塩素 / 酸素）分子が（春 / 秋）に紫外線のはたらきで原子に分解され，それがオゾンを連鎖的に破壊することで形成される。2020年に北半球の極域でオゾン全量が少なくなったのは，直前の冬が平年よりも（高温 / 低温）であったことと関連していると考えられる。

第16講 PART2 確認問題

問1 次の文章を読み，下の問いに答えよ。

大気の循環による物質の輸送は，環境に大きな影響を与えている。例えば，オゾンは酸素分子に（ ア ）が作用して生成されるため，$_a$低緯度で多く生成されるが，大気の循環により高緯度へ輸送される。同様に，オゾン層を破壊するフロンも高緯度へ輸送される。

南半球の高緯度地域では毎年９～10月ごろ（春先）にオゾン層の破壊が起こり，$_b$南極上空にオゾン濃度の極端に低い領域が現れる。これは，フロンを起源とする（ イ ）分子が，冬に蓄積され，それが春になって（ ウ ）によって原子に分解され，オゾンを分解することによって起こる現象である。

(1) 空欄ア，ウに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① ア：紫外線 ウ：赤外線
② ア：赤外線 ウ：紫外線
③ ア：紫外線 ウ：紫外線
④ ア：赤外線 ウ：赤外線

(2) 下線部ａについて，オゾンが低緯度で多く生成される理由として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① 日射量が多いから。
② 貿易風が吹き込むから。
③ 強い上昇気流が発生するから。
④ 湿度が高いから。

(3) 下線部ｂについて，このような領域の名称として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① 極成層圏雲　② オーロラ
③ 極渦　④ オゾンホール

(4) 下線部ｂについて，このような領域は，北極上空では，南極上空ほど大規模なものは形成されていない。その理由として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① 北極は低温が維持されず，極成層圏雲が少ないため。
② 北極は低温が維持され，極成層圏雲が多いため。
③ 北極は極成層圏雲が少なく，低温が維持されるため。
④ 北極は極成層圏雲が多く，低温が維持されないため。

(5) 空欄イに入る語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① 窒素　② 酸素
③ 塩素　④ 水素

PART3 都市とその周辺の大気

目標　逆転層およびヒートアイランド現象とは何か，それぞれ説明できる。

Chapter1　都市とその周辺の大気

人間活動がさかんな都市周辺では，大気にも人間活動の影響がみられます。ここでは，その例について学びましょう。

逆転層と大気汚染

・逆転層とは

対流圏では,ふつう高度とともに気温が（高く / 低く）なる。対流圏の中で高度とともに気温が（高く / 低く）なっている部分を**逆転層**という。

・接地逆転層

放射冷却によって地表面が強く冷却されると，ある程度の高度から地表までの間で下層ほど気温が低く，つまり高度とともに気温が高くなることがある。これを接地逆転層という。

・接地逆転層と大気汚染

逆転層の内部では気温減率が（湿潤断熱減率より小さく / 乾燥断熱減率より大きく），大気は（絶対安定 / 絶対不安定）である。

そのため，接地逆転層内部で排出された大気汚染物質は一定の高度に（留まりやすい / 留まりにくい）。また，上空に逆転層があるとき，それより下部で排出された大気汚染物質は逆転層より下部に留められ，地表付近の大気汚染が進みやすい。

知っておこう

地表付近に寒気，その上に暖気が重なるとき，その境界にあたる前線面付近では高度とともに気温が高くなります。これを前線性逆転層といいます。

また，高気圧の圏内では下降気流が生じて，断熱圧縮により温度が上昇します。下降気流とその下の空気との境界付近では高度とともに気温が高くなることがあり，これを沈降性逆転層といいます。

ヒートアイランド現象

・ヒートアイランド現象とは

都市部の気温が周囲より高くなる現象を**ヒートアイランド現象**という。

・ヒートアイランド現象をもたらす都市部の特徴

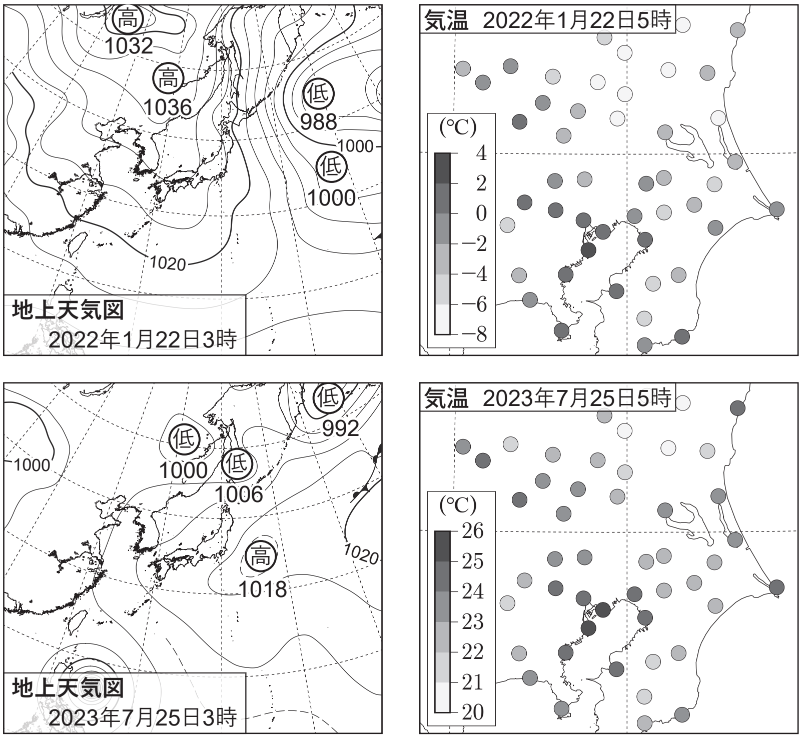
・人間活動による排熱が大きい。

・土壌や植生が少ないため，水の状態変化のために地表面から奪われる熱量が（多い / 少ない）。

・高層建築物が多くの熱を吸収するとともに，風の流れを妨げる。

・ヒートアイランド現象の起こりやすい条件

都市部の周囲で放射冷却の特に強く起こりやすいとき，すなわちよく晴れて風の弱い（夏 / 冬）には，ヒートアイランド現象がはっきりとみられやすい。



（データは気象庁による）

まとめ

・対流圏の中で，通常とは異なり気温が上空ほど高くなっている部分を＿＿＿＿＿という。

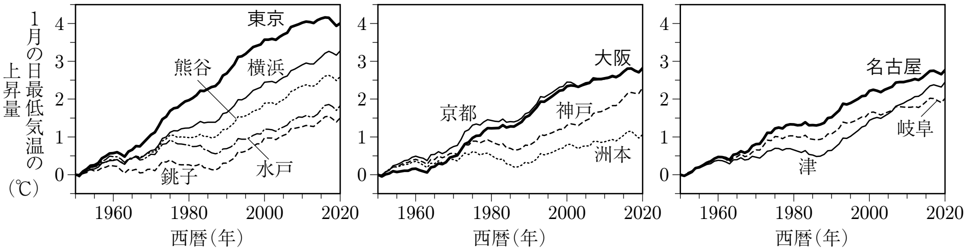
・人間活動による排熱などにより，都市部の気温が周辺より高くなる現象を＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿という。

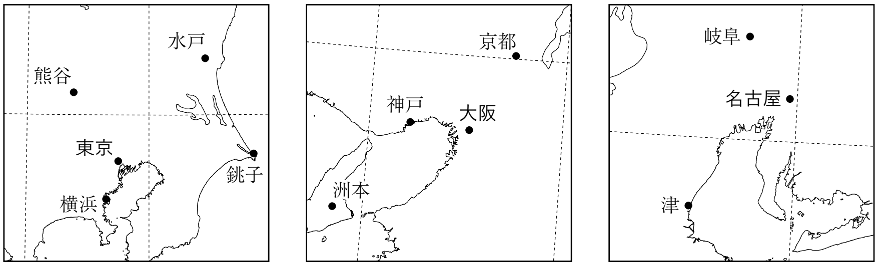
Chapter2　演習問題

ここでは，都市における人間活動が大気に与える影響について確認していきましょう。

問題⑴　次の図は，東京，大阪，名古屋の 3 都市とその周辺における，1 月の日最低気温の平均値の変化を示したものです。この図について述べた下の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。ただし，グラフの縦軸は，それぞれの年の直前 30 年間の平均値が，1921 ～ 1950 年の平均値を基準として何℃高いかを表しています。

（気象庁による観測値をもとに作成）





図に示されたすべての地点において，1 月の日最低気温は上昇傾向にある。しかし，その上昇量は地点によって異なっており，いずれのグラフでも中心となる大都市で大きく，その周辺では小さい傾向がある。特に，東京における上昇量は過去 70 年間で約 4℃であり，この値は水戸や銚子における上昇量のおよそ（2 ～ 3 倍 / 10 ～ 20 倍）となっている。

このように，都市部では全球的な地球温暖化に加えて，都市化による温度上昇が起こっている。都市部の気温が周辺より高くなる現象を（エルニーニョ現象 / ヒートアイランド現象）という。

問題⑵　逆転層の形成と大気汚染物質の分布について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。ただし，乾燥断熱減率を 10℃ /km，湿潤断熱率を 5℃ / km とします。

都市部の地表付近で排出された大気汚染物質は，大気中に広がっていく。ここで，地表付近の大気の気温減率が 6℃ /km であり，上空に逆転層があるときについて考えよう。地表付近の大気は乾燥した空気塊に対して（安定 / 不安定），飽和した空気塊に対して（安定 / 不安定）であり，大気の状態は（絶対安定 / 条件付き不安定 / 絶対不安定）である。その一方で，逆転層は（絶対安定 / 条件付き不安定 / 絶対不安定）なので，逆転層を超えるような対流は（起こりやすい / 起こりにくい)。そのため，地表付近で排出された大気汚染物質は，（逆転層の上空に広がりやすい / 逆転層の下部に留まりやすい）といえる。

問題⑶　大気汚染物質とその広域的な輸送について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

雨水は，大気中の（酸素 / 二酸化炭素）が溶けることで pH＝5.6 程度の弱い酸性となっている。ここに人間活動によって生じた（酸素やオゾン / 一酸化窒素や二酸化窒素）を起源とする硝酸イオンや（フロン / 二酸化硫黄）を起源とする硫酸イオンが加わると，雨水の pH はさらに小さくなる。そのような雨を酸性雨といい，酸性雨は植生や湖沼の生態系，建築物などに影響を与える。

また，化石燃料の燃焼により大気中にエーロゾルが放出されると，エーロゾルはアルベドや温室効果を通して気候に影響を与えるほか，凝結核となって雲のでき方や雨の降り方を変化させる。

酸性雨の原因物質やエーロゾルは，偏西風や（海陸風 / 季節風）などによって 1000km 以上運ばれることがある。

第16講　PART3　確認問題

問1　次の文章を読み，下の問いに答えよ。

放射冷却によって地表面の温度が下がり，地表付近の大気が冷やされると，ある程度の高度までは，高度とともに気温が高くなることがある。このような層を（　ア　）という。この層の内部では大気の安定性が（　イ　），内部で排出された大気汚染物質が一定の高度に留まりやすい。

都市部では，人間活動による大量の排熱などの影響もあり，周辺の郊外より気温が高くなることがある。この現象を（　ウ　）といい，よく晴れた（　エ　）に特に顕著である。

(1)　空欄ア，イに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ア：接地逆転層　　イ：高く
②　ア：接地逆転層　　イ：低く
③　ア：前線性逆転層　　イ：高く
④　ア：前線性逆転層　　イ：低く

(2)　空欄ウに入る語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　温室効果　　②　ヒートアイランド現象
③　エルニーニョ現象　　④　フェーン現象

(3)　空欄エに入る語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　風の強い夏　　②　風の強い冬
③　風の弱い夏　　④　風の弱い冬

< Note >

PART4 物質循環

目標 物質循環における平均滞留時間とは何かを説明し，計算できる。

Chapter1　物質循環

地球上にある物質の多くは，ただそこにあるだけでなく，長い時間のうちに形を変え，循環しています。ここでは，その例について学びましょう。

水循環

・**地球表層の水** 地学基礎

地球表層の水のうち約（97% / 70%）は海水である。残りは雪氷と地下水が約半分ずつであり，川や湖，大気中などの水は全体の 0.01% 程度に過ぎない。

・**水の移動と物質や熱の輸送**

水はさまざまな物質を溶かし込んで輸送している。

また，液体の水は比熱が大きく，温まりにくく冷めにくい。そのため海流や熱塩循環の流れは熱輸送を担っている。

さらに，水は現在の地球表層の温度条件において，気体・液体・固体の間で状態変化する。そのため，水は水蒸気のもつ潜熱の形でも熱輸送を行っている。

・**平均滞留時間**

質量 M の水が入ったタンクがあり，このタンクへの水の単位時間あたりの流入量と流出量がともに F だとする。このとき，タンクに水分子の留まる平均時間を**平均滞留時間**といい，平均滞留時間 t は

$$t = \frac{M}{F}$$

と表される。

知っておこう

平均滞留時間は，タンクの中の水が内部で混ざることなく押し出されていくと考えたとき，タンク全体の水が完全に入れ替わるまでにかかる時間にあたります。

ここでの「タンク」は，水循環における「大気中の水蒸気」や「海水」などをモデル化したものです。

また，ここでは水を例に挙げましたが，他の物質の平均滞留時間も同じように考えることができます。

炭素循環

・炭素循環の概要

火成活動によって地球内部から地球表層に放出される炭素は，おもに CO_2 として温室効果ガスとなる。また，CO_2 は雨水に溶けて酸として（物理的風化 / 化学的風化）を引き起こす。

さらに，炭素は生物を構成する有機物や炭酸塩となる。海底に堆積・沈殿した有機物や炭酸塩はプレートの（発散 / 収束）によってマントルへと取り込まれ，地球表層から除去される。

・地球史と炭素循環

地球形成直後には CO_2 が大気の主成分となっていた。原始海洋が形成され，プレート運動が起こるようになると，CO_2 は炭酸塩として地球表層から除去されて減少した。

また，（古生代 / 中生代）のデボン紀から石炭紀にかけては大型の（シダ植物 / 裸子植物）が繁栄し，その遺がいが埋没することで大量の石炭が形成された。これは，地球表層の炭素を陸域の生物岩として除去する作用である。

現在は，人類が化石燃料を利用している。これは，生物岩の形で除去されていた炭素を地球表層へと戻す作用だといえる。

まとめ

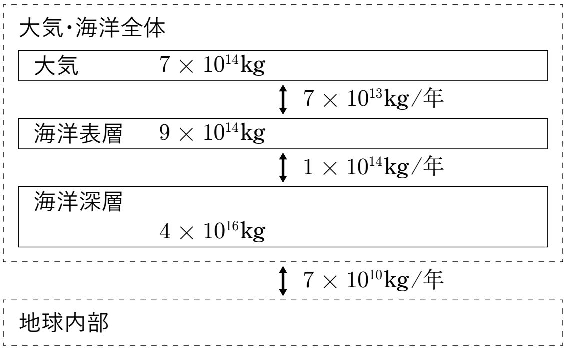
・地球表層の水のうち約 97% は________であり，残りの大部分は雪氷と________である。

・水は地球表層をめぐり，物質や熱を輸送している。

・質量 M の水が入ったタンクがあり，単位時間あたり F の水が流入・流出しているとき，このタンクに水分子の留まる平均時間を______________といい，_____と表される。

Chapter2　演習問題

次の図は，地球の大気・海洋における炭素の存在量と移動量を模式的に示したものです。ここでは，炭素循環を例として平均滞留時間の考え方について確認していきましょう。ただし，図中の数値はすべて正確な数値として扱ってよいものとします。また，実際には大気と陸域との間などでも炭素のやり取りがありますが，ここでは簡単のために図中にあるもののみを考えます。



問題(1)　大気の炭素について述べた次の文章中の空欄［　**ア**　］～［　**ウ**　］に入る数値を上から 1 桁の概数で答えましょう。

ここでは大気と海洋表層との間の炭素のやり取りだけを考える。このとき，大気の炭素量が［　**ア**　］kg，大気への炭素の流入量と流出量がともに 1 年あたり［　**イ**　］kg なので，大気における炭素の平均滞留時間は［　**ウ**　］年と求められる。

問題(2)　問題(1)と同じように大気・海洋内部の炭素のやり取りを考えて，海洋表層と海洋深層における炭素の平均滞留時間をそれぞれ上から 1 桁の概数で答えましょう。

問題⑶　地球表層の炭素について述べた次の文章中の空欄［　**エ**　］に入る数値を上から1桁の概数で答えましょう。

ここでは大気と海洋全体を1つのまとまりとみて，その内部の炭素の平均滞留時間を求めよう。**問題⑴**・**問題⑵**と同じように考えると，この平均滞留時間は［　**エ**　］年となる。

問題⑷　化石燃料の利用について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

人間活動による活発な化石燃料の燃焼を単純化したモデルとして，1年あたり 1×10^{10} kgの炭素がちょうど300年間だけ大気に放出される状況を考える。

このとき，放出される時間は**問題⑴**で求めた大気における炭素の平均滞留時間より十分（長い / 短い）が，**問題⑶**で求めた大気と海洋全体における炭素の平均滞留時間より十分（長い / 短い）。

つまり，炭素の放出が始まると，その影響は速やかに大気全体へと広がる。大気中に放出された炭素は，やがて海洋へと運ばれて堆積岩として地球表層から除去されていく。地球表層から人間活動による炭素の放出の影響がなくなるのは，炭素の放出が（終わった直後 / 終わって長い時間が経過してから）のことである。

第16講　PART4　確認問題

問１　次の文章を読み，下の問いに答えよ。

地球上にある物質の多くは形を変えながら循環している。水はさまざまな物質を溶かし込んで輸送している。また，液体の水は（　ア　），状態変化に伴い大量の（　イ　）が発生するという性質により，水は大量の熱を輸送している。

炭素は火成活動によって二酸化炭素として地球表層に放出される。二酸化炭素は水に溶けやすく，海水中で炭酸塩となって堆積したり，生物の作用で有機物になったりする。これらは（　ウ　）により，地球内部に取り込まれ，地球表層から除去される。一方，（　エ　）は除去された炭素を地球表層へ戻す作用だといえる。

⑴　空欄ア，イに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ア：温まりにくく冷めにくい　　イ：潜熱
②　ア：温まりにくく冷めにくい　　イ：顕熱
③　ア：温まりやすく冷めやすい　　イ：潜熱
④　ア：温まりやすく冷めやすい　　イ：顕熱

⑵　空欄ウ，エに入る語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ウ：海流　　エ：化石燃料の消費
②　ウ：海流　　エ：植物の光合成
③　ウ：プレートの沈み込み　　エ：化石燃料の消費
④　ウ：プレートの沈み込み　　エ：植物の光合成

問2　物質の循環の中で，物質がある状態にとどまる時間を平均滞留時間という。大気中に含まれる水の量を M，単位時間に大気から出ていく量と入ってくる量をともに F とするとき，水の大気中での平均滞留時間を表す式として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　MF　　②　$\dfrac{M}{F}$　　③　$\dfrac{F}{M}$　　④　$M-F$

第17講　日本列島の今・昔
PART1 現在の日本近海の海洋環境

目標　黒潮と親潮について，流れ，水温，塩分の違いに着目して説明できる。

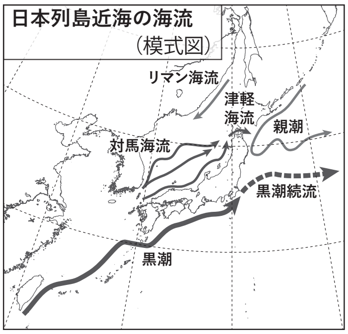
Chapter1　現在の日本近海の海洋環境

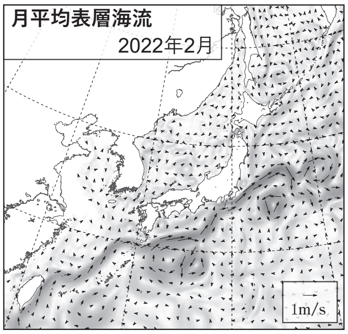
日本列島は海に囲まれており，そこではさまざまな流れがみられます。ここでは，それらの流れの特徴について学びましょう。

日本近海の海流

・日本近海の海流

（データは気象庁による）

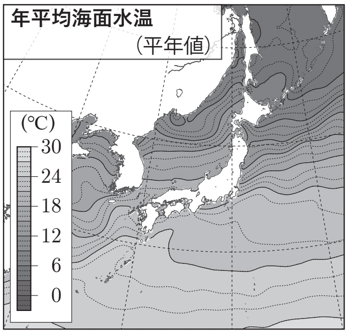


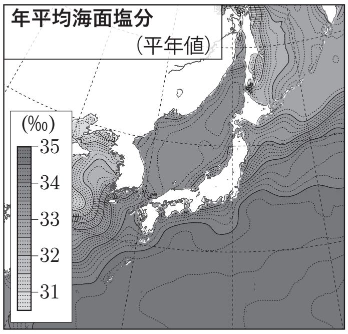


→黒潮は速いところで 1m/s を超えるが，親潮は 0.5m/s に満たない。

・日本近海の水温と塩分

（データは気象庁による）





→伊豆諸島付近の黒潮より千島列島付近の親潮の方が，年平均の海面水温は約（5℃ / 15℃）低く，塩分は約 1.5‰（高い / 低い）。

知っておこう

窒素，リン，ケイ素などの生物必須元素を含む無機化合物（無機塩類）を栄養塩といいます。親潮は，単位体積あたりで黒潮の数倍に及ぶ大量の栄養塩を含んでいます。

栄養塩が十分にあり，適切な水温や十分な日射などの条件が整うと，植物プランクトンが増殖します。

海流以外の海水の流れ

・潮流

潮汐によって生じる海水の流れを**潮流**という。潮流は海底から海面までの海水全体の流れであり，潮汐は波長の非常に長い（表面波 / 長波）とみなすことができる。

幅の狭い海峡では，潮流が毎秒（数 m / 数百 m）程度の速い流れとなることがある。

・津波

津波は波長が最大（数百 m / 数百 km）の（表面波 / 長波）であり，大きな津波が海岸に押し寄せると，海水全体が陸側に入り込んだり，反対に海側へと引いていったりするように見える。

津波は遠洋域で毎秒(数百 m / 数百 km)程度の速さで進み，海岸付近で水深が浅くなると伝わる速さが（大きく / 小さく）なる。そのため，津波の波高は海岸付近で大きくなりやすい。特に，リアス海岸に多く見られる V 字型に奥まった湾では，押し寄せた海水が湾の奥に集中することで波高が特に大きくなる傾向がある。

知っておこう

渦潮で有名な鳴門（なると）海峡のほか，明石（あかし）海峡，来島（くるしま）海峡，関門（かんもん）海峡，といった狭い海峡では潮流が速くなりやすく，古くから現在に至るまで船にとっての難所となっています。

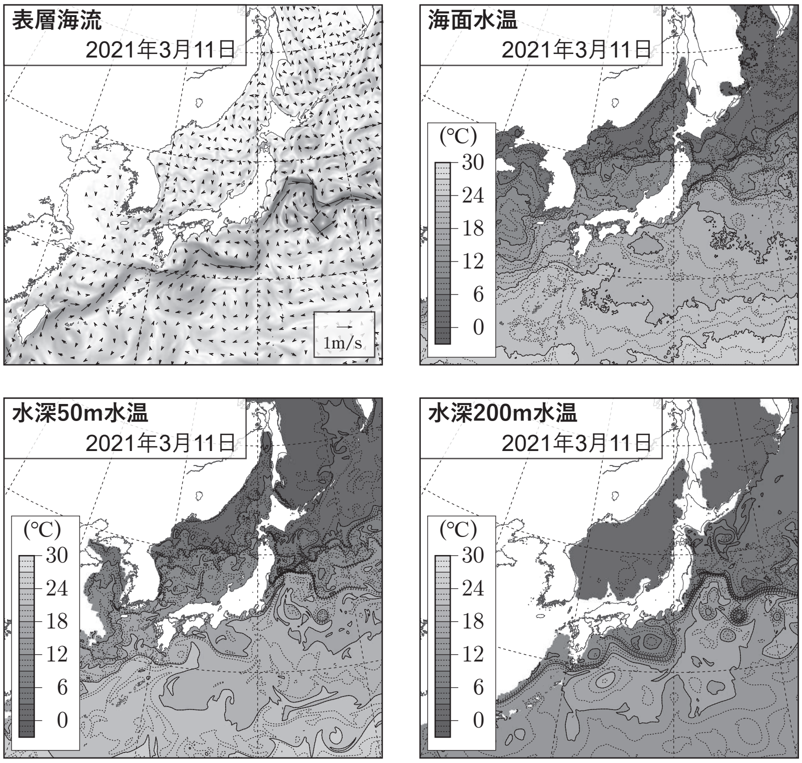
まとめ

- 日本近海の太平洋の主要な海流としては，西日本から東北地方にかけての沿岸を北上する________と，北海道から東北地方にかけての沿岸を南下する________がある。
- 黒潮は親潮より流速の________海流であり，海水の水温は________，塩分は________。
- 潮汐によって生じる海流の流れを______といい，幅の狭い海峡では特に流れが速くなりやすい。
- 大地震などによって発生する______は波長の非常に長い波であり，海岸付近では波高が________なりやすい。

Chapter2　演習問題

次の図は，ある日の日本近海の流速と水温の分布を示したものです。ここでは，これらの図を用いて日本近海の海流について確認しましょう。

（データは気象庁による）



問題⑴　黒潮について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

黒潮の流れは地衡流とみなすことができることが知られている。地衡流は圧力傾度力と（摩擦力 / 遠心力 / 転向力）のつり合った流れである。よって，たとえば関東の南にあたる伊豆諸島付近の海上で黒潮が北へ向かって流れているとき，圧力傾度力は（東 / 西）向きにはたらいているといえる。海水中のある深さにおける圧力はそれより上部にある海水の質量にほぼ比例するので，この日の伊豆諸島付近では東から西に向かって海面高度が（高く / 低く）なっていたと考えられる。

問題(2)　水温と海面高度との関係について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

海洋深層のある深さにおいて水圧が一定だとすると，それより上にある海水の質量は場所によらず等しいといえる。海水の密度は水温が高いほど（大きい / 小さい）ので，海面高度が高い部分は水温が（高い / 低い）部分に対応すると考えられる。実際に，図からは伊豆半島付近では東から西に向かって水温が（高く / 低く）なっていることが読み取れて，これは**問題**(1)で考えた海面高度の分布から想定される水温の分布と整合的である。

知っておこう

圧力が一定となる基準面をとり，それより上にある物質の質量が等しいと考えるのは，アイソスタシーと同じ考え方です。

問題(3)　太平洋に存在する渦について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

表層海流の図からは，紀伊半島から東海地方の沖合において黒潮が南側に大きく蛇行しているようすが読み取れる。黒潮がこのような流路をとることを大蛇行という。大蛇行している部分の内側には（時計回り / 反時計回り）の渦が形成されており，この流れのエクマン輸送は渦の（中心に向かう / 中心から離れる）向きである。そのため，渦の中心付近では深い部分から冷たい海水が湧き上がっている。

黒潮や親潮の流路の周辺には，大蛇行よりやや小さい程度の渦がいくつか見られる。周囲より高温の渦を暖水渦，低温の渦を冷水渦といい，暖水渦は（時計回り / 反時計回り），冷水渦は（時計回り / 反時計回り）の流れに対応している。

第17講　PART1　確認問題

問1　次の文章を読み，下の問いに答えよ。

日本近海における大きな海流として，太平洋を北上する黒潮と，南下する親潮がある。また，日本海には黒潮から分かれた(　ア　)がある。黒潮と親潮は海水温が違うだけでなく，$_a$流速や塩分などが異なっている。

海流以外では，(　イ　)によって生じる海水の運動を$_b$潮流という。潮流は一般に幅が狭くなる$_c$海域で強くなり，秒速数 m 程度の速い流れとなる。他に，海底での大規模な隆起や沈降が急激に起こることによって生じる津波がある。津波の速さは$_d$水深によって変化する。

(1)　空欄アに入る語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　黒潮続流　　②　リマン海流
③　対馬海流　　④　宗谷海流

(2)　下線部 a について，黒潮と親潮の流速と塩分の比較として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　流速は黒潮の方が大きく，塩分は黒潮の方が高い。
②　流速は黒潮の方が大きく，塩分は親潮の方が高い。
③　流速は親潮の方が大きく，塩分は黒潮の方が高い。
④　流速は親潮の方が大きく，塩分は親潮の方が高い。

(3)　空欄イに入る語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　潮汐　　②　風
③　塩分の違い　　④　水温の違い

(4) 下線部 b について，潮流の特徴として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① 海の表層だけの流れである表面波

② 海の表層だけの流れである風浪

③ 海の表層から海底までの海水全体の流れである長波

④ 海の表層から海底までの海水全体の流れであるうねり

(5) 下線部 c について，潮流の強い海域として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① 三陸沖　　② 南西諸島沖

③ 東京湾　　④ 関門海峡

(6) 下線部 d について，海岸付近で水深が浅くなるところでの津波の様子として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① 伝わる速さは速くなり，波高は高くなる。

② 伝わる速さは速くなり，波高は低くなる。

③ 伝わる速さは遅くなり，波高は高くなる。

④ 伝わる速さは遅くなり，波高は低くなる。

PART2 現在の日本列島の気象

目標 山雪，里雪，ブロッキング高気圧，線状降水帯とは何か，それぞれ説明できる。

Chapter1 冬の気象

地学基礎では，日本列島の四季の気象について学んでいます。ここでは，冬の気象について少し詳しく見ていきましょう。

冬の気象

・冬の降雪と大気の安定性

冬のユーラシア大陸では地表付近が強く冷却され，地表付近に厚い逆転層が形成される。逆転層は（絶対不安定 / 絶対安定）である。

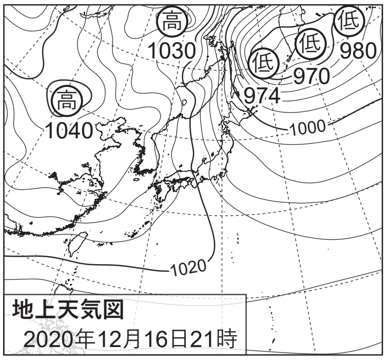
大陸のシベリア高気圧から吹き出す冷たく乾燥した空気は，暖かい日本海の海面から熱と水蒸気を供給される。これにより海面付近に（不安定 / 安定）な層が形成され，その層の中で雲が発達する。

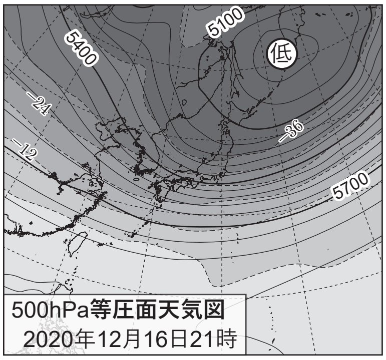
・山雪

地上天気図の等圧線の間隔が（広い / 狭い）とき，季節風が強く，日本海上には明瞭な筋状の雲が形成される。この雲は背が低いが，季節風が日本列島の山地に達して上昇させられると雲の発達が進み，日本海側の山沿いに降雪をもたらす。このようにして生じる雪を**山雪**という。

復習
日本列島の四季
日本列島の四季の気象の概要や災害については，地学基礎でも詳しく扱われています。そちらもしっかりと見直しておきましょう。

知っておこう
北西の季節風は山地の日本海側で雪を降らせることで水蒸気を失い，風下側にあたる太平洋側では北西の乾燥した風が吹きます。関東地方では，この風をからっ風と呼びます。

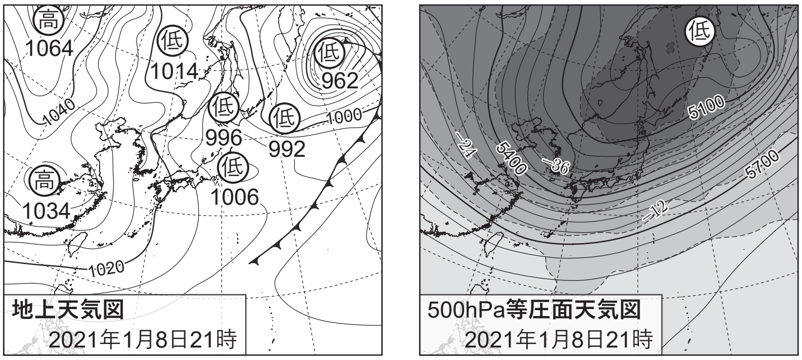




（データは気象庁による）

・**里雪**

日本海の上空に強い寒気が流れ込んだとき，地上天気図の等圧線の間隔が比較的（広く / 狭く）季節風が弱い条件でも，日本海側に大雪がもたらされることがある。このとき，日本海上では寒気の影響で大気の状態が上空まで（安定 / 不安定）になりやすく，比較的背の高い雲が発達している。そのため，海岸沿いの平野部で大雪となりやすい。一方で，季節風が弱いため山地での上昇も弱く，山沿いでの雲の発達や降雪はあまり起こらない。このようにして生じる雪を**里雪**という。



（データは気象庁による）

まとめ

・冬には，大陸の________高気圧から吹き出した冷たく乾燥した空気が日本海で熱と水蒸気を供給される。
・季節風が強いときは，日本海側の山沿いで雲が発達して大雪をもたらし，このような雪を______という。
・季節風が弱く，日本海の上空に強い______が流入したときは，雲が日本海上で発達して平野部に大雪をもたらすことがあり，このような雪を______という。

Chapter2　春から秋にかけての気象

春から秋にかけては，天気の移り変わりが大きな時期です。
ここでは，春から秋にかけての気象について学びましょう。

春や秋の気象

・移動性高気圧と温帯低気圧

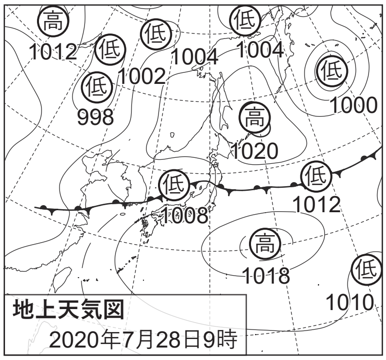
春や晩秋には偏西風波動が（東 / 西）へと進みやすくなり，日本列島の上空を気圧の谷と気圧の尾根が交互に通過する。これによって日本列島付近を通過する高気圧を**移動性高気圧**という。移動性高気圧と温帯低気圧の影響により，天気は（1～2 日 / 3～5 日）程度の周期で変化することが多い。

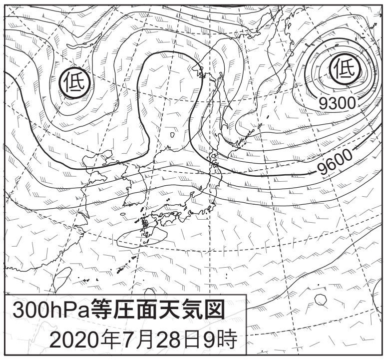
梅雨から初秋にかけての気象

・オホーツク海高気圧

（対流圏の上部 / 成層圏の下部）を吹くジェット気流は，ヒマラヤ山脈・チベット高原の影響を受けて大きく蛇行することがある。この蛇行は数日間～数週間にわたって停滞することがあり，これによって形成される高気圧を**ブロッキング高気圧**という。

特に，東シベリアの上空でジェット気流がΩ状に蛇行すると，その東側にあたるオホーツク海の地上付近には高気圧が形成される。この高気圧を**オホーツク海高気圧**という。





（データは気象庁による）

・**線状降水帯**

多くの積乱雲が列をなし，幅20～50km，長さ50～300km程度の細長い領域で数時間にわたって強い雨が降り続くことがある。この降水域を**線状降水帯**という。

線状降水帯の発生・維持は，次のような要素が組み合わさって起こると考えられている。

・地表付近の特定の領域に暖かく湿った空気の流入が続くこと。
・局地的な前線や地形の影響により上昇気流が生じること。
・大気の状態が不安定で積乱雲が発達すること。
・上空の風により積乱雲が一定方向に流されること。

まとめ

・ジェット気流が大きく蛇行し，その状態が数日間～数週間続くことで形成される高気圧を＿＿＿＿＿＿＿＿という。
・多くの＿＿＿＿が列をなし，数時間にわたって強い雨が降り続く細長い領域を＿＿＿＿＿＿という。

Chapter3　演習問題

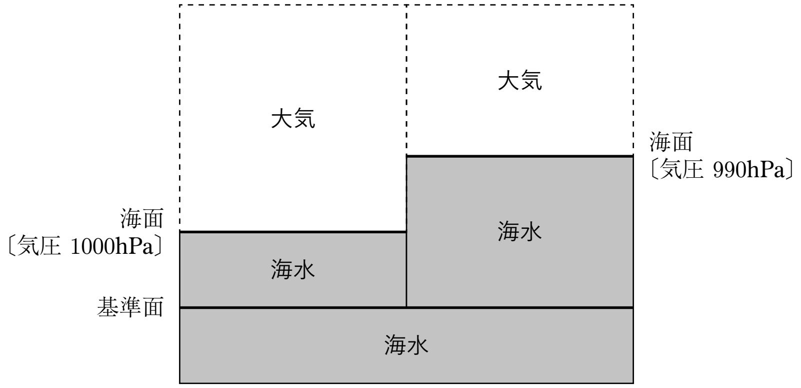
ここでは，これまでに学んだ知識を組み合わせて，日本列島の気象災害について確認しましょう。

問題(1) 台風と高潮について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

台風が接近すると，海岸沿いでは海面が上昇することがある。これを高潮という。台風の接近が 1 日の中で潮位の高い（大潮 / 満潮）の時間帯にあたっているときは，特に潮位が高くなりやすい。

高潮の原因の 1 つは気圧の低下による海面の上昇であり，吸い上げ効果と呼ばれる。もう 1 つの原因は風による海面の上昇であり，吹き寄せ効果と呼ばれる。これらの効果により，海面は最大で（数 cm / 数 m / 数百 m）程度上昇することがある。

問題(2) 吸い上げ効果は，アイソスタシーの考え方で説明できます。次の図を参考にして，吸い上げ効果について述べた後の文章中の空欄［　**ア**　］・［　**イ**　］に入る式と，空欄［　**ウ**　］～［　**カ**　］に入る数値を答えましょう。ただし，海水の密度を 1000kg/m^3，重力加速度を 10m/s^2 とします。



アイソスタシーの考え方では，流動性をもつ物質の中に基準面をとったとき，その上にある物質の質量は場所によらず等しい。

海面上に底面積 S の空気柱を考え，その質量を M，重力加速度を g とする。空気柱が海面を押す力は［　**ア**　］，海面における気圧は［　**イ**　］と表せる。すなわち，海面 $1m^2$ の上にある大気の質量は海面気圧が 1000hPa のとき［　**ウ**　］kg，海面気圧が 990hPa のとき［　**エ**　］kg である。つまり，海面気圧が 990hPa のときの方が海面 $1m^2$ の上にある大気の質量が［　**オ**　］kg だけ小さく，海面 $1m^2$ の下の基準面までにある海水の質量は［　オ　］kg だけ大きい。したがって，海面気圧が 990hPa のときの方が海面は［　**カ**　］cm だけ高くなっているといえる。

知っておこう

この計算結果からは，中心気圧の低い台風では吸い上げ効果も無視できないものの，100cm を超えるような高潮を考える上では吹き寄せ効果が重要であることがわかります。台風との位置関係によって風向が異なるので，台風の中心からの距離だけでなく，台風との位置関係に注目する必要があるということですね。

問題⑶　大気中の水蒸気と線状降水帯について述べた次の文章中の空欄［　**キ**　］・［　**ク**　］に入る数値を答えましょう。ただし，水の密度を $1000kg/m^3$ とします。

大気が暖かく湿っているとき，最大で 1kg あたり 10g 程度の水蒸気を含むことができる。仮に海面 $1m^2$ の上にある［　ウ　］kg の大気柱がすべて 1kg あたり 10g の水蒸気を含んでいるとすると, 水蒸気の質量は［　**キ**　］kg である。これがすべて凝結すると，海面 $1m^2$ の上に［　**ク**　］mm の水柱を作る。実際の大気は上空ほど低温であり，含まれる水蒸気の量はこれよりも少ない。

すなわち，ある時点である地点の上空にある水蒸気がすべて凝結したと考えただけでは，3 時間に 150mm を超えるような線状降水帯の大雨は説明できない。線状降水帯の大雨には，湿った空気の風による流入が重要だといえる。

第17講 PART2 確認問題

問1 次の文章を読み，下の問いに答えよ。

日本の気象は複雑である。冬は大陸の地表面が低温となることで，（ ア ）高気圧が発達し，冷たく乾燥した北西の季節風が吹き出してくる。この季節風の影響で a日本海側では大雪が降る。

春や秋には，偏西風波動が日本の上空を通過するようになり，日本付近を（ イ ）高気圧と温帯低気圧が交互に通過する。そのため，天気は b周期的に変化することが多い。

梅雨の時期には，ジェット気流がヒマラヤ山脈・チベット高原の影響を受けて大きく蛇行することによって，空気が停滞し，高気圧が形成されやすくなる。このようにして形成される高気圧を（ ウ ）高気圧という。梅雨の時期に見られる，細長い線状の地域で数時間にわたって強い雨が降り続く降水域を線状降水帯といい，多くの（ エ ）が列をなして移動してくることで生じる。

(1) 空欄ア～ウに入る高気圧の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① ア：シベリア　イ：移動性　ウ：ブロッキング
② ア：シベリア　イ：ブロッキング　ウ：移動性
③ ア：北太平洋　イ：移動性　ウ：ブロッキング
④ ア：北太平洋　イ：ブロッキング　ウ：移動性

⑵　下線部ａについて，日本海側の平野部にもたらされる大雪についての説明として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　季節風が弱い条件で大雪が降り，山雪とよばれる。

②　季節風が弱い条件で大雪が降り，里雪とよばれる。

③　季節風が強い条件で大雪が降り，山雪とよばれる。

④　季節風が強い条件で大雪が降り，里雪とよばれる。

⑶　下線部ｂについて，春や秋の天気の周期として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　１～２日程度　　②　３～５日程度

③　１週間程度　　④　２週間程度

⑷　空欄エに入る語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　高層雲　　②　乱層雲

③　積乱雲　　④　巻雲

PART3 日本列島の地質

目標　フォッサマグナ，四万十帯，領家帯，三波川帯，中央構造線とは何か，それぞれ簡潔に説明できる。

Chapter1　日本列島の地質区分の概要

日本列島の地表は，多くの場所でさまざまな堆積物や火山岩に覆われています。ここでは，その下にある日本列島の基盤岩について学びましょう。

日本列島の基盤岩

・**基盤岩**

日本列島の地表の半分以上は，新生代の新しい火山岩や堆積物で覆われている。その下に位置するかたい岩石を**基盤岩**という。

大陸東縁に位置する日本列島の基盤岩は，もともと大陸を構成していたものと，プレートの沈み込みに関連して形成されたものに大別される。

・**東北日本と西南日本**

糸魚川(いといがわ)―静岡構造線を境として，東側を**東北日本**，西側を**西南日本**という。また，糸魚川―静岡構造線を西縁とする帯状の部分では基盤岩が溝のように陥没しており，複雑に変形した新生代の地層や火山岩が分布している。この帯状の部分を**フォッサマグナ**という。

東北日本では，基盤岩の上を火山岩や堆積物の層が厚く覆っている。そのため，地表付近には基盤岩がほとんど現れていない。

西南日本では，基盤岩を構成する付加体や広域変成帯が帯状に分布する。海溝側に新しい付加体が形成されていったため，西南日本では太平洋側から日本海側に向かって地質帯の年代が（新しく / 古く）なっている。

まとめ

・日本列島は，＿＿＿＿＿＿＿構造線を境界として東北日本と西南日本に分けられる。

・この構造線を西縁とする帯状の部分では基盤岩が溝のように陥没しており，この部分を＿＿＿＿＿＿＿という。

・西南日本の地質帯は，太平洋側から日本海側に向かって年代が＿＿＿＿なっている。

Chapter2　日本列島の地質帯

日本列島の地表は，多くの場所でさまざまな堆積物や火山岩に覆われています。ここでは，その下にある日本列島の基盤岩について学びましょう。

日本列島の地質帯

・東北日本の地質帯

ほとんどの基盤岩はプレートの沈み込みに関連して形成されたものである。

北海道の日高山脈西縁には大規模な（正断層 / 逆断層）があり，その東側に接する地質帯を**日高帯**という。日高帯は堆積岩のほかに地殻下部起源の（安山岩 / 斑れい岩）やマントル起源の（かんらん岩 / 流紋岩）も含み，これらの岩石は古第三紀に千島弧が東北日本弧に衝突することで上昇してきたものだとされている。日高山脈は，この大陸地殻どうしの衝突に伴って形成されたと考えられている。

知っておこう

島弧―海溝系を構成する火山弧を，それぞれ「～弧」と呼ぶことがあります。日本列島周辺の火山弧には，千島海峡に対応する千島弧，日本海溝に対応する東北日本弧，南海トラフに対応する西南日本弧，南西諸島海溝に対応する琉球弧，伊豆・小笠原海溝に対応する伊豆・小笠原弧があります。

・西南日本の地質帯

大陸起源の岩石として，島根県の一部には原生代の変成岩，山陰地方〔隠岐（おき）帯〕と飛驒（ひだ）山地〔飛驒帯〕には古生代の片麻岩や深成岩が分布する。

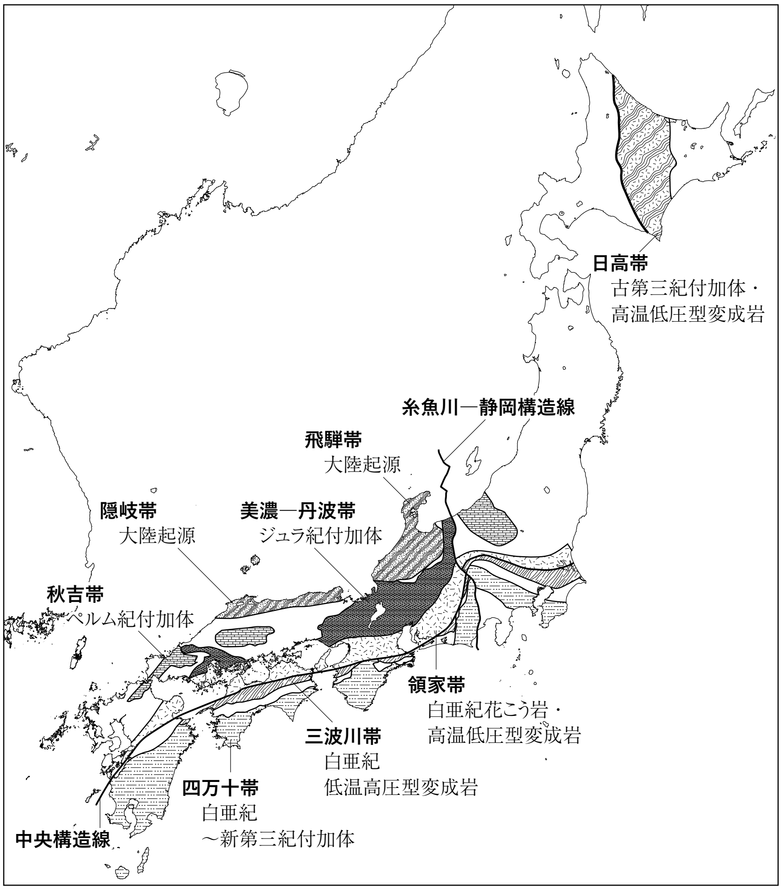
古生代後半以降には，プレートの沈み込みに関連する地質帯が形成された。秋吉（あきよし）帯に含まれる（石灰岩 / チャート）は，海洋プレート上の海山のサンゴ礁に由来する。

秋吉帯はペルム紀，美濃―丹波帯はジュラ紀，四万十帯は白亜紀～新第三紀の付加体である。

プレートの沈み込みに関連する地質帯は，中国地方や四国地方では東西に長い帯状に見える。互いの境界は大規模な（不整合 / 断層）であり，特に領家（りょうけ）帯の南側の境界を**中央構造線**という。

中央構造線の北側に接する領家帯が白亜紀の花こう岩や高温低圧型広域変成岩からなるのに対して，中央構造線の南側に接する三波川帯は，ほぼ同時期の低温高圧型広域変成岩か

らなる。



知っておこう

付加体の年代は海溝に付加した年代，変成帯の年代は変成作用を受けた年代を指します。

知っておこう

左に描いたもの以外にも，日本には多くの地質帯があります。また，研究者によっては隠岐帯と飛驒帯を隠岐―飛驒帯とまとめたり，美濃―丹波帯を美濃帯と丹波帯に分けたりすることがあります。

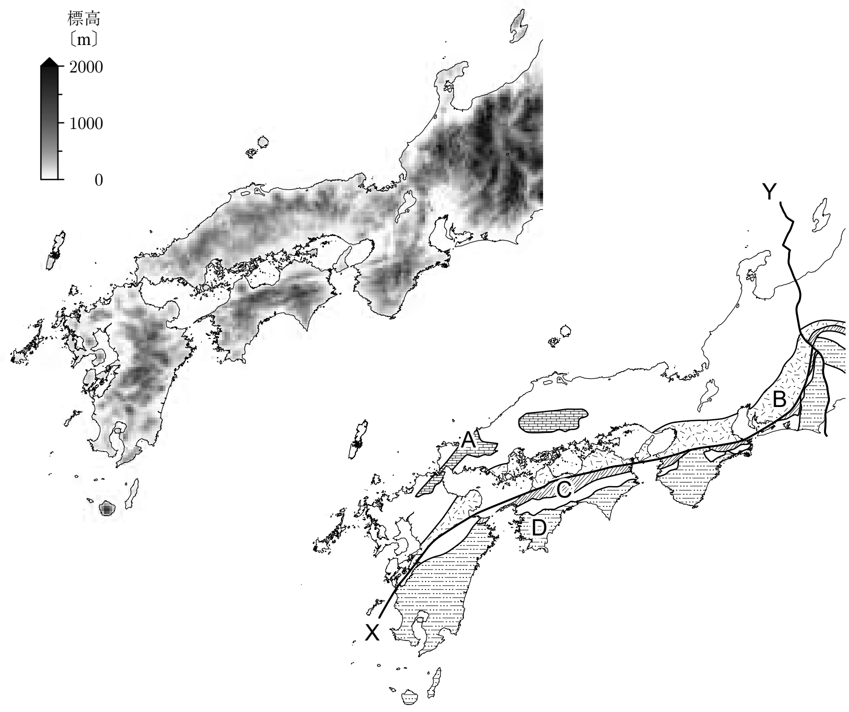
まずは左に挙げた主要なものをしっかりと頭に入れた上で，教科書やインターネットなどで他の地質帯について調べてみるのもよいでしょう。

まとめ

- 海洋プレートの沈み込みに関連して形成された西南日本の代表的な付加体としては，ペルム紀の＿＿＿＿帯，ジュラ紀の＿＿＿＿＿＿帯，白亜紀～新第三紀の＿＿＿＿＿帯が挙げられる。
- 広域変成岩を含む西南日本の代表的な地質帯としては，白亜紀の高温低圧型広域変成岩を含む＿＿＿＿帯や，ほぼ同時期の低温高圧型広域変成岩からなる＿＿＿＿帯がある。
- これらの地質帯どうしの境界は大規模な＿＿＿であり，特に＿＿＿＿帯の南側の境界を中央構造線という。

Chapter3　演習問題

次の図は，日本列島の一部について，標高と地質帯の分布を示したものです。ここでは，これらの図を用いて日本列島の地質構造について確認しましょう。



問題(1)　断層と地形について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

断層沿いでは岩石がもろく，侵食を受けやすい。たとえば，図中に**X**として示されている（糸魚川―静岡構造線 / 中央構造線）や，**Y**として示されている（フォッサマグナ / 糸魚川―静岡構造線）は，谷状の地形として確認できる。これらの断層は地質帯どうしの境界であり新第三紀以前に形成されたものだが，多くの部分で活断層として現在も活動している。

問題⑵ 西南日本の地質帯の形成過程について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

西南日本のうち中国地方や四国地方の周辺では，太平洋側からのプレートの沈み込みに伴って形成された帯状の地質帯が確認できる。

図の A は秋吉帯と呼ばれる付加体である。秋吉帯にあたる山口県の秋吉台や福岡県の平尾台には，大規模な石灰岩の岩体が見られる。これらの石灰岩は，（石炭紀～ペルム紀 / 古第三紀）に形成されたことが（フズリナ / ヌンムリテス）やサンゴなどの化石からわかっている。このような石灰岩は海洋プレート上の海山に形成されたサンゴ礁に起源をもち，（ペルム紀 / 白亜紀）に付加したものだと考えられている。

また，B は（三波川帯 / 領家帯）であり，ここには深成岩や（低温高圧型 / 高温低圧型）の広域変成岩が分布する。この広域変成岩は，（ペルム紀 / 白亜紀）に起こった（苦鉄質 / ケイ長質）マグマの火成活動と関連して形成されたものである。

さらに，C は（三波川帯 / 領家帯）であり，ここには（低温高圧型 / 高温低圧型）の広域変成岩が分布する。この広域変成岩の原岩は（ペルム紀 / 白亜紀）の付加体であり，付加直後に変成を受けたとされる。

最も南側に分布する D は（美濃・丹波帯 / 四万十帯）と呼ばれる付加体である。現在陸上に見られる付加体は，白亜紀から新第三紀初頭にかけて付加したものだとされている。このうち白亜紀に付加した部分を（北帯 / 南帯），新生代に入ってから付加した部分を（北帯 / 南帯）と呼び分けることもある。

第 17 講　PART3　確認問題

問 1　次の文章を読み，下の問いに答えよ。

日本列島は，（　ア　）を境にして東西に分けられる。（　ア　）を西縁とする帯状の部分では，岩石や地層の変形が激しく，基盤岩が大規模に陥没しており，この帯状の部分を（　イ　）という。

（　ア　）の西側の（　ウ　）では，付加体が東西に長く帯状に広がっており，大陸側から太平洋側に向けて形成年代が（　エ　）。それらの中で，高温低圧型変成岩を含む（　オ　）と低温高圧型変成岩を含む（　カ　）の間には，大きな断層である（　キ　）がある。

(1)　空欄アに入る語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　中央構造線　　②　糸魚川－静岡構造線
③　フォッサマグナ　　④　和達－ベニオフ帯

(2)　空欄イに入る語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　中央構造線　　②　糸魚川－静岡構造線
③　フォッサマグナ　　④　和達－ベニオフ帯

(3)　空欄ウ，エに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ウ：西南日本　　エ：古くなる
②　ウ：西南日本　　エ：新しくなる
③　ウ：北西日本　　エ：古くなる
④　ウ：北西日本　　エ：新しくなる

⑷　空欄オ，カに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　オ：領家帯　　カ：三波川帯

②　オ：三波川帯　カ：領家帯

③　オ：隠岐帯　　カ：飛騨帯

④　オ：飛騨帯　　カ：隠岐帯

⑸　空欄キに入る語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　中央構造線　　②　糸魚川－静岡構造線

③　フォッサマグナ　　④　和達－ベニオフ帯

PART4 新生代の日本列島

目標　日本列島の主要な炭田の形成，日本海の形成，および縄文海進について，それぞれ簡潔に説明できる。

Chapter1　新生代の日本列島

　縁海である日本海が形成され，日本列島が現在のような姿になったのは新生代のことです。ここでは，新生代のできごとについて学びましょう。

古第三紀のできごと

・石炭層の形成

　日本列島にあたる領域は大陸縁辺部に位置しており，低湿地が広がった。温暖な環境で森林が発達し，その植物の遺がいが堆積して埋没したものが石狩炭田，常磐（じょうばん）炭田，筑豊（ちくほう）炭田といった日本各地の主要な炭田のもととなった。

知っておこう

古第三紀の石炭層は，中生代以前の付加体の上に形成されたものです。
　このような付加体の上の堆積物は中生代から形成されています。福井県や兵庫県などで恐竜化石が発見されている地層は，大陸縁辺部の堆積物がもとになっています。

新第三紀のできごと

・日本海の形成

　2000 万年前～ 1500 万年前ごろ，背弧の地下におけるマントルの上昇流によって海洋地殻の形成が起こった。このとき，海洋底が拡大するとともに横ずれ断層が活動し，縁海である日本海が形成された。

　日本海の形成時において，東北日本は（時計回り ／ 反時計回り），西南日本は（時計回り ／ 反時計回り）に回転して日本列島は現在のような概形となったと考えられている。このような回転運動は，新第三紀に形成された火成岩のもつ古地磁気の（偏角 ／ 伏角）をもとに推定される。

・**伊豆・小笠原弧の衝突**

700 万年前ごろ，伊豆・小笠原弧がフォッサマグナの南端に衝突した。この前後の活発な火成活動により多数の小さな火山が生じ，伊豆半島が形成された。また，衝突の影響で，中部地方周辺における基盤岩の帯状の構造が北に凸となった。

第四紀のできごと

・**氷期と間氷期のくり返しと海面の上下動**

第四紀は，氷期と間氷期がくり返されて海面が上下した。特に，最終氷期には海面が現在より 100m 以上（上昇 / 低下）し，温暖だった縄文時代には海面が現在より数 m 程度（上昇 / 低下）した。これにより海岸沿いの平野部に海水が入り込んだことを**縄文海進**という。

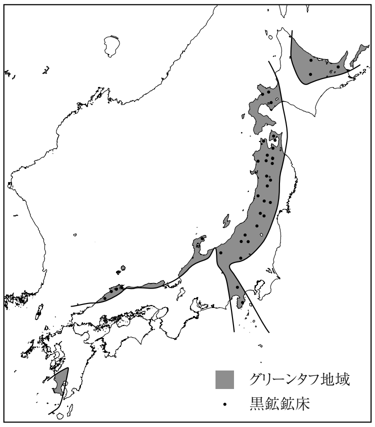
まとめ

・日本列島の主要な炭田は，＿＿＿＿＿＿紀に低湿地に広がった森林を構成した植物の遺がいがもととなった。
・日本海は，2000 万年前～ 1500 万年前ごろ，背弧における海洋底の拡大によって形成された。
・第四紀には氷期と間氷期のくり返しによって海面が変動し，特に縄文時代の温暖な環境で平野部に海水が入り込んだことを＿＿＿＿＿＿という。

Chapter2　演習問題

ここでは，日本海の形成過程や，その後の日本列島の地殻変動および気候について確認しましょう。

問題⑴　次の図は，グリーンタフ地域および黒鉱鉱床の分布を示したものです。日本海の形成について述べた下の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。



約 2000 万年前～ 1500 万年前，（前弧 / 背弧）では地下のマントルの上昇流によって火成活動が起こり，海洋底が拡大した。このとき，初めのうちは帯状の低地が形成され，そこへ海水が流入した。やがて東北日本が（時計回り / 反時計回り），西南日本が（時計回り / 反時計回り）に回転し，現在のような「逆くの字型」の日本列島の概形が形成された。

グリーンタフ地域は，グリーンタフと呼ばれる新第三紀の岩石が分布する地域である。グリーンタフは緑色に変質した（火山岩 / 深成岩）であり，海底火山活動の結果として形成される。

また，黒鉱鉱床は銅や鉛などの金属を中心とする鉱床であり，マグマから分離した熱水が海水と反応して生じた火成鉱床の一種である。

グリーンタフ地域や黒鉱鉱床の分布からは，日本海形成時に活発な海底火山活動が起こったことが推定される。

問題⑵　日本海の形成以降の地殻変動について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

日本海が形成されたとき，東北日本には東西方向の（引張 / 圧縮）の力がはたらいていた。その後，新第三紀の終わりには東西方向の（引張 / 圧縮）の力がはたらくようになり，それに伴う（正断層 / 逆断層）や褶曲が発達した。南北にのびる奥羽山脈や出羽丘陵などの山地は，この頃に形成されたと考えられている。

問題⑶　日本海と日本列島の気候について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

最終氷期には，日本列島でも気温が現在より 5℃以上低かったと考えられている。しかし，この時期の日本海側の降雪量は現在より少なかったとされる。これはなぜだろうか。

現在の日本海は，４つの海峡によって周囲の海とつながっている。４つの海峡のうち，対馬海峡と津軽海峡の最深部の水深は約 130m，宗谷海峡と間宮海峡の最深部の水深は 100m 未満である。

ここで，最終氷期の最も海面の低下した時期には，海面が現在よりも（120cm ～ 130cm / 120m ～ 130m）程度低かったと考えられている。すなわち，この時期には４つの海峡のうち（対馬海峡と津軽海峡 / 宗谷海峡と間宮海峡）が陸化し，他の２つの海峡も水深が極端に小さくなった。その結果として，（対馬海流 / 親潮）の日本海への流入が妨げられ，日本海南部の水温は現在よりも大幅に（高かった / 低かった）。そのため，冬の（北西 / 北東）の季節風に対する日本海からの熱や水蒸気の供給量は（大きかった / 小さかった）。このことが，最終氷期における日本海側の降雪量が現在より少なかった理由だと考えられる。

第17講 PART4 確認問題

問1 次の文章を読み，下の問いに答えよ。

新生代に日本海が形成され，日本列島は現在のような姿になった。古第三紀には日本列島にあたる領域は，まだ大陸辺縁部にあり，a森林が発達していた。2000 万年前～ 1500 万年前ごろにマントルの上昇流によって大陸東縁が引き裂かれ，東北日本と西南日本にあたる部分ができて，回転することにより日本列島と日本海が形成された。その後，700 万年前ごろには，（　ア　）が衝突し，中部地方周辺の基盤岩の帯状分布が北に凸状の形になった。

第四紀になると，b気候変動が激しくなり，これに伴って海水面が変動した。約 1 万年前にはそれまでとくらべて（　イ　）な気候となり，海水面が（　ウ　）した。

⑴ 下線部 a について，森林を形成していた植物の遺がいが堆積したものがもととなってできたものとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① 石油　　② 石炭
③ 天然ガス　　④ メタンハイドレート

⑵ 空欄アに入る語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① 東北日本弧　　② 西南日本弧
③ 千島弧　　④ 伊豆・小笠原弧

⑶　下線部ｂについて，この時代に具体的に起きた気候変動として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　氷期と間氷期のくり返し

②　地球全体の凍結

③　火山ガスの温室効果による温暖化

④　日射が遮られることによる寒冷化

⑷　空欄イ，ウに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　イ：温暖　　ウ：上昇

②　イ：温暖　　ウ：低下

③　イ：寒冷　　ウ：上昇

④　イ：寒冷　　ウ：低下

第 18 講　惑星の運動と見え方
PART1 地球の自転と公転

目標　地球が自転や公転をしていることの証拠について，それぞれ説明できる。

Chapter1　地球の自転

地球に昼と夜があるのは，地球が自転しているからです。ここでは，地球の自転を確認する方法について学びましょう。

地球の自転とその証拠

・地球の自転

地球は，北極と南極を通る軸を中心として約 1 日周期で回転している。これを**自転**という。

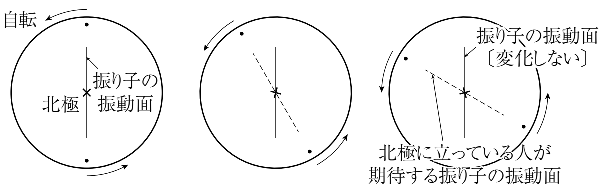
・フーコーの振り子

振り子のおもりにかかる力が重力と糸の張力だけだったとすると，振り子の振動面は変化しない。ところが，実際に長い時間振り子を振動させて地球上で観察すると，北半球では振動面が時計回りに回転していく。これは，運動する物体に対して右向きの（遠心力 / 転向力）がはたらいているためだと考えることができる。この見かけの力は地球が自転しているために生じるものであり，振動面の回転は地球の自転の証拠となる。この巨大な振り子を**フーコーの振り子**という。

知ってておこう

1851 年，フランスのフーコー（Jean Bernard Léon Foucault）は，パリにあるパンテオンという当時教会として用いられていた建築物の中で，長さ 67m に及ぶ巨大な振り子を振らせて振動面の変化を示す実験を行いました。

北極の上空から自転の影響を受けずに観測したときの見え方



まとめ

- 地球は北極と南極を通る軸を中心として約 1 日周期で回転しており，これを自転という。
- 振り子を長い時間振動させて地球上で観察すると，北半球では振動面が______回りに回転するように見える。
- これは地球が自転していることを示し，__________の振り子と呼ばれている。

Chapter2　地球の公転

地球は太陽のまわりを運動していますが，地球から見ると，太陽が地球のまわりを動いているようにも見えます。ここでは，地球の公転運動を確認する方法について学びましょう。

地球の公転とその証拠

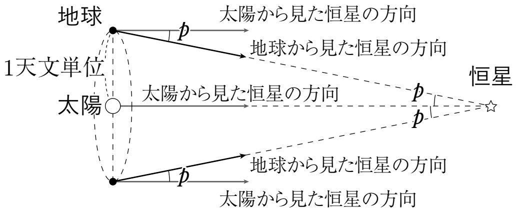
・地球の公転

地球は太陽のまわりを約 1 年周期で円を描くように運動している。これを**公転**という。

・年周視差

太陽と地球は離れているため，太陽から見たときと地球から見たときで，恒星の見える方向が少しだけ異なる。地球は 1 年周期で公転しているため，恒星の見える向きも 1 年周期で変化する。この 1 年間に生じるずれの角度の半分〔図の p〕を**年周視差**という。年周視差の存在は，地球の公転を示す証拠となる。

年周視差の大きさは，天体までの距離に（よらず一定である / 比例する / 反比例する)。



・年周光行差

光は有限の速さで進むため，観測者が恒星からの光を横切る方向に高速で移動するとき，光の進行方向は実際の進行方向とずれて見える。地球は 1 年周期で公転しているため，光の進行方向と地球の移動方向との関係が 1 年周期で変化し，光の進行方向のずれも 1 年周期で変化する。このずれの大きさ〔図の θ〕を**年周光行差**という。年周光行差の存在は，地球の公転を示す証拠となる。

知っておこう

1838 年，ドイツのベッセル (Friedrich Wilhelm Bessel) は，はくちょう座 61 番星の年周視差を 0.3136 秒角とする論文を発表しました。この値は最新の研究による値（0.2860 秒角）と約 10% しか違わず，この論文は恒星の年周視差を正確に求めた最初の論文とされています。

覚えておこう

天文分野では，非常に小さな角を扱います。小さな角を表すとき，「分角」あるいは「秒角」が用いられることがあります。

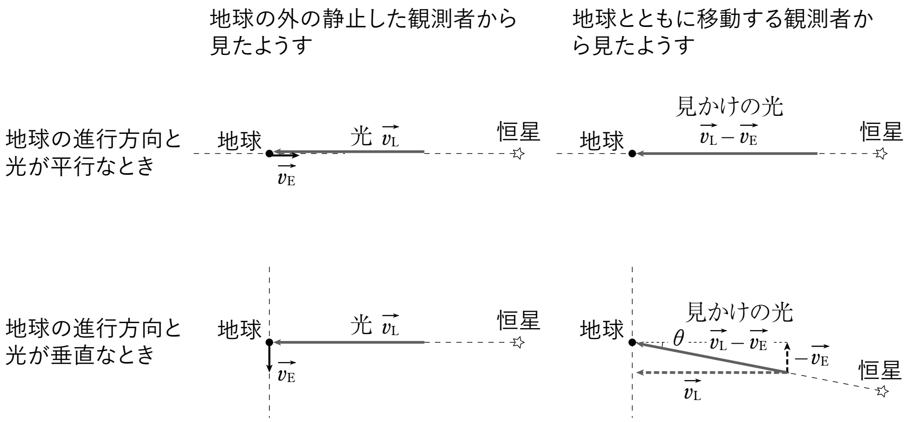
1° =60′（分角）
1′ =60′′ (秒角)

という関係を覚えておきましょう。

知っておこう

年周視差と恒星の距離との関係については，別の Part で詳しく学びます。

年周光行差の 1 年間における最大値は，天体までの距離に（よらず一定である / 比例する / 反比例する）。



まとめ

- 地球は太陽のまわりを約 1 年周期で円を描くように運動しており，これを______という。
- 太陽と地球は離れているため，地球から恒星の見える方向は 1 年周期で変化して見える。
- このずれの角度の半分を______といい，天体までの距離に______。
- 光は有限の速さで進み，地球はそれに対して無視できない程度の高速で移動しているため，光の進行方向は実際の進行方向とずれて見える。
- このずれの大きさを______といい，1 年間における最大値は天体までの距離に______。

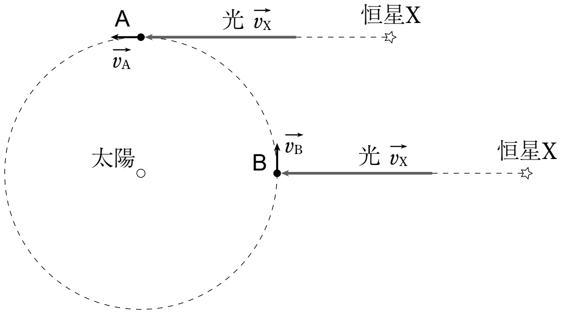
知っておこう

1729 年，イギリスのブラッドレー（James Bradley）は，年周光行差の理論と観測結果に関する論文を発表しました。彼はりゅう座 γ 星の年周視差を測定しようと試みる過程で年周光行差を発見しました。さらに，他のいくつかの恒星の観測とあわせて，年周光行差の 1 年間における最大値がどの恒星でも 20 ～ 20.5 秒角であることを確認しました。

また，彼は観測結果をもとに年周視差が 1 秒角を超えないと考え，恒星は 40 万天文単位より遠い場所にあると予想しました。

Chapter3　演習問題

次の図は，年周光行差について考えるための模式図であり，太陽や恒星 X が動かないと考えて描いたものです。ここでは，この図を参考にして年周光行差について確認しましょう。



問題(1)　年周光行差について述べた次の文章中の空欄［　ア　］・［　イ　］に入る式を答えましょう。また，(　　　)について，正しいものを選びましょう。

地球の公転軌道と同じ平面上の，地球から十分離れた場所に恒星 X があるとする。このとき，地球の公転軌道において，恒星 X からの光は平行光線とみなすことができる。

地球が A の位置にあるとき，恒星 X からの光 $\vec{v}_X$ は，地球の公転 $\vec{v}_A$ とちょうど同じ向きである。このとき，地球から見た恒星 X からの光を表すベクトルは［　ア　］である。このベクトルの向きは $\vec{v}_X$ と同じであり，地球から見た恒星 X の方向は，太陽から見た恒星 X の方向と同じである。

地球が B の位置にあるとき，恒星 X からの光 $\vec{v}_X$ は，地球の公転 $\vec{v}_B$ と直交している。このとき，地球から見た恒星 X からの光を表すベクトルは［　イ　］である。このベクトルの向きは $\vec{v}_X$ と異なっており，地球から見た恒星 X の方向は，太陽から見た恒星 X の方向を基準として地球の進行方向と（同じ向き / 逆向き）にずれている。

知っておこう

アインシュタインの特殊相対性理論によれば，光に対して左のようなベクトルの足し算を考えるのは不適切です。しかし，地球の公転速度程度の運動であれば，左のように考えても十分よい近似になることが知られています。

問題⑵ 年周光行差について述べた次の文章中の空欄［ **ウ** ］に入る式および［ **エ** ］・［ **オ** ］に入る数値を答えましょう。ただし,［ **オ** ］は上から 3 桁の概数で答えましょう。

地球が B の位置や，太陽をはさんで B と反対の位置にあるとき，年周光行差の大きさは 1 年のうちで最大となる。その大きさを α として，光速度を c，地球の公転速度を v とすると，［ **ウ** ］＝ $\tan\alpha$ と表せる。

ここで，α を弧度法で表すと，α が十分小さければ $\tan\alpha = \alpha$ と近似できることが知られている。年周光行差の大きさは十分小さいので，［ ウ ］＝ α と近似できることになる。

1° ＝［ **エ** ］秒角，180° ＝ π ラジアンであることから，年周光行差の大きさの最大値 20.5 秒角は［ **オ** ］π ラジアンと表せる。すなわち，［ ウ ］＝［ オ ］π である。

問題⑶ 年周光行差と光速度について述べた次の文章中の空欄［ **カ** ］・［ **キ** ］に入る式および［ **ク** ］～［ **コ** ］に入る数値を答えましょう。ただし，［ **ク** ］は上から 3 桁の概数，［ **ケ** ］・［ **コ** ］は整数でそれぞれ答えましょう。

地球の公転半径を r，公転周期を T，公転速度を v，円周率を π とすると，r ＝［ **カ** ］と表せる。よって，光速度を c，光の太陽から地球までの所要時間を t とすると，t ＝［ **キ** ］と表せる。

地球の公転周期を 365 日とすると T ＝［ **ク** ］秒なので，**問題⑵**の結果を用いると t ＝［ **ケ** ］分［ **コ** ］秒と求められる。

知っておこう

ここで行った計算は，ブラッドレーが行ったものと基本的に同じものです。

彼は年周光行差の測定によって地球が公転していることを示しただけでなく，光速度がどのような値なのか（太陽から地球までの距離を進むためにどれだけの時間がかかるのか）も正確に求めたのです。

第 18 講　PART1　確認問題

問 1　次の文章を読み，下の問いに答えよ。

地球の（　ア　）について，初めて実験で証明したのは（　イ　）で，巨大な振り子を振らせて，a 振動面が回転していくことを示した。

地球の（　ウ　）を示す証拠に，年周視差と年周光行差があり，それぞれ（　エ　）とブラッドレーによって発見された。年周視差は，地球から見た恒星の方向が 1 年周期で変化するときの角度のずれで表され，恒星までの距離に（　オ　）。年周光行差は，地球から見た恒星からの光の進行方向が 1 年周期で変化するときのずれの大きさで表され，その最大値は恒星までの距離に（　カ　）。

⑴　空欄ア，イに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ア：自転　　イ：ガリレオ
②　ア：自転　　イ：フーコー
③　ア：公転　　イ：ガリレオ
④　ア：公転　　イ：フーコー

⑵　下線部 a について，北半球での振動面の回転の向きと，その原因となる力の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　回転の向き：時計回り　　力：遠心力
②　回転の向き：時計回り　　力：転向力
③　回転の向き：反時計回り　　力：遠心力
④　回転の向き：反時計回り　　力：転向力

⑶　空欄ウ，エに入る語句の組合せとして最も適当なものを，
次の①〜④のうちから一つ選べ。

①　ウ：自転　エ：ベッセル
②　ウ：自転　エ：ケプラー
③　ウ：公転　エ：ベッセル
④　ウ：公転　エ：ケプラー

⑷　空欄オ，カに入る語句の組合せとして最も適当なものを，
次の①〜④のうちから一つ選べ。

①　オ：比例する　カ：反比例する
②　オ：比例する　カ：関係なく一定である
③　オ：反比例する　カ：反比例する
④　オ：反比例する　カ：関係なく一定である

PART2 ケプラーの法則

目標　ケプラーの第 1 法則，第 2 法則，第 3 法則について，それぞれ簡潔に説明できる。

Chapter1　ケプラーの法則

地球は太陽系の惑星の 1 つです。ここでは，惑星の公転に関する法則について学びましょう。

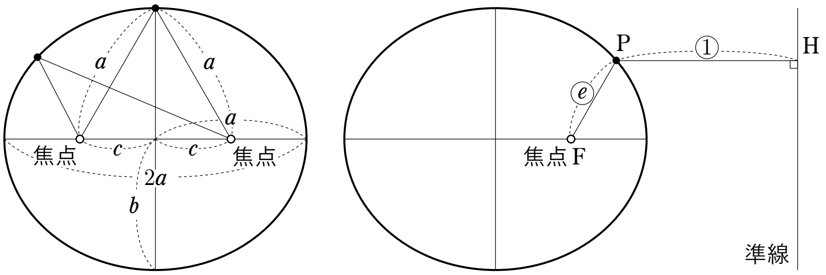
ケプラーの第1法則と第2法則

・楕円 数学C

2 定点からの距離の和が一定である点の軌跡を**楕円**という。また，この 2 定点を楕円の**焦点**という。

数学では図の $2a$ の長さを長軸，$2b$ の長さを短軸と呼ぶが，地学では a の長さを**長半径**，b の長さを短半径と呼ぶ。

また，楕円は 1 定点〔焦点〕と定直線〔準線〕からの距離の比が一定［ $0 < e < 1$ を満たす定数 e を用いて FP：PH $= e : 1$ ］である点の軌跡としても表され，この e を**離心率**という。楕円の中心から焦点までの距離を c とすると，$e = \frac{c}{a}$ が成り立つ。



・ケプラーの第 1 法則〔楕円軌道の法則〕

太陽系の惑星は，太陽が焦点の 1 つにあるような楕円軌道を描いて公転する。

・**ケプラーの第2法則〔面積速度一定の法則〕**

ある惑星と太陽を結ぶ線分が単位時間に通過する部分の面積は一定である。

ケプラーの第3法則

・**太陽系の惑星についてのケプラーの第3法則〔調和の法則〕**

公転軌道の長半径を a〔天文単位〕，公転周期を P〔年〕とすると，太陽系のすべての惑星について

$$\frac{a^3}{P^2}=1$$

が成り立つ。

・**一般化したケプラーの第3法則**

質量 m_1，m_2 の2天体が共通重心のまわりを長半径 a_1，a_2 で公転するとき，万有引力定数を G として

$$\frac{(a_1+a_2)^3}{P^2}=\frac{G(m_1+m_2)}{4\pi^2}$$

が成り立つ。

覚えておこう

楕円軌道の長半径は平均距離とも呼ばれます。

知っておこう

ケプラーが観測事実に基づいて3つの法則を導いたのに対して，その理論的な根拠を示したのがイギリスのニュートン（Isaac Newton）です。1687年，彼は運動の法則と万有引力の法則を用いてケプラーの法則を導くことに成功しました。

まとめ

・第1法則：太陽系の惑星は，太陽が________の1つにあるような楕円軌道を描いて公転する。
・第2法則：ある惑星と太陽を結ぶ線分が単位時間に通過する部分の面積は一定である。
・第3法則：公転軌道の長半径を a〔天文単位〕，公転周期を P〔年〕とすると，太陽系のすべての惑星について____________が成り立つ。

Chapter2　演習問題

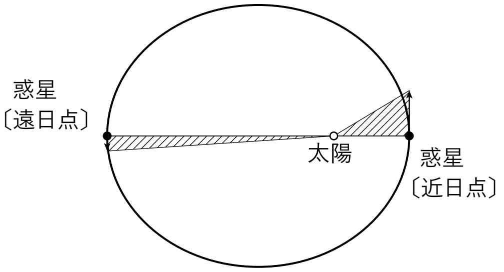
ここでは，具体的な例を用いてケプラーの法則について確認しましょう。

問題(1)　ケプラーの第1法則について述べた次の文章中の(　　　)について，正しいものを選びましょう。

ケプラーの第1法則は，楕円軌道の法則とも呼ばれる。これは，惑星は太陽が（中心 / 焦点の1つ）にあるような楕円軌道を描いて公転する，という法則である。

惑星が太陽に最も近づく点を近日点，最も遠くなる点を遠日点という。また，そのそれぞれの地点における惑星と太陽との距離を近日点距離，遠日点距離という。火星の公転軌道の離心率が0.094であることを用いると，火星の遠日点距離は近日点距離のおよそ（1.1倍 / 1.2倍 / 1.9倍 / 2.0倍）であることがわかる。

問題(2)　次の図は，ケプラーの第2法則を説明する模式図です。この図の斜線で表された三角形は，単位時間に惑星と太陽を結ぶ線分が通過する部分を近似的に表しています。この図を参考にして，ケプラーの第2法則について述べた文章中の（　　　）について，正しいものを選びましょう。



ケプラーの第 2 法則は，ある惑星と太陽を結ぶ線分が単位時間に通過する部分の面積は一定である，という法則である。

特別な場合として，近日点と遠日点について考えよう。これらの地点では惑星と太陽を結ぶ線分が惑星の公転する向きと垂直であり，斜線部は直角三角形となっている。**問題⑴**の結果と近日点と遠日点で斜線部の面積が等しいことを用いると，火星の近日点における公転速度は遠日点における公転速度のおよそ（0.8 倍 / 0.9 倍 / 1.1 倍 / 1.2 倍）であることがわかる。

問題⑶　ケプラーの第 3 法則について述べた次の文章中の空欄［　**ア**　］に入る数値および［　**イ**　］に入る式を答えましょう。また，（　　　）について，正しいものを選びましょう。

ケプラーの第 3 法則によると，公転軌道の長半径を a〔天文単位〕，公転周期を P〔年〕とすると，太陽系のすべての惑星について

$$\frac{a^3}{P^2} = [\quad \textbf{ア} \quad]$$

が成り立つ。このとき，

$$P = [\quad \textbf{イ} \quad]$$

と表せる。よって，公転軌道 1 周にかかる時間は惑星が太陽から遠いほど（長い / 短い）。すなわち，太陽系の（内側 / 外側）を公転する惑星は（内側 / 外側）を公転する惑星を追い抜いていくということがわかる。

第 18 講　PART2　確認問題

問 1　ケプラーの法則について，次の問いに答えよ。

(1)　ケプラーの第 1 法則として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　惑星は太陽を焦点の 1 つとする放物線軌道を描く。
②　惑星は太陽を焦点の 1 つとする楕円軌道を描く。
③　惑星は地球を焦点の 1 つとする放物線軌道を描く。
④　惑星は地球を焦点の 1 つとする楕円軌道を描く。

(2)　ケプラーの第 2 法則について，次の文の空欄アに入る語句として最も適当なものを，下の①～④のうちから一つ選べ。

　ある惑星と太陽を結ぶ線分が単位時間に通過する部分の（　ア　）は一定である。

①　質量　　②　長さ　　③　面積　　④　体積

(3)　ケプラーの第 3 法則について，次の文の空欄イに入る式として最も適当なものを，下の①～④のうちから一つ選べ。ただし，a は惑星と太陽の平均距離，P は惑星の公転周期である。

　すべての惑星について，（　イ　）の値は等しい。

①　$\frac{a^2}{P}$　　②　$\frac{a^3}{P}$　　③　$\frac{a^3}{P^2}$　　④　$\frac{a^2}{P^3}$

< Note >

PART3 天球と太陽の動き

目標　天の赤道，黄道，春分点とは何か，それぞれ簡潔に説明できる。

Chapter1　天球と太陽の動き

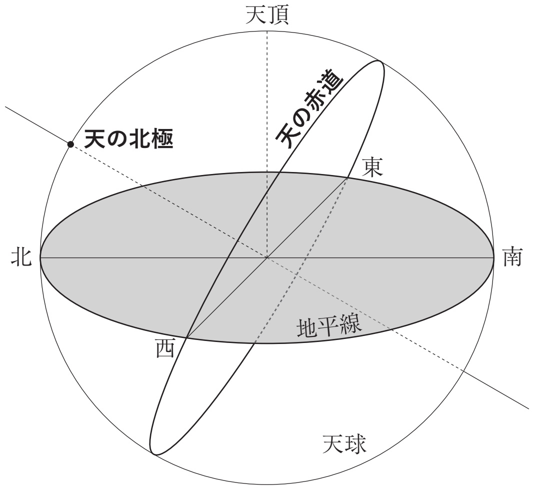
私たちは地動説が正しいことを知っていますが，天体は夜空に貼りついて回転しているように見えます。ここでは，天球について学びましょう。

天球

・天球とは

天体は遠方にあり，地球から観測したときに天体ごとの距離の違いを感じることはない。そこで，天体の存在する面として観測者を中心とする限りなく大きな球面を考え，これを**天球**と呼ぶ。

また，地球の赤道面と天球との交線を**天の赤道**，地球の自転軸の北極側の延長と天球との交点を**天の北極**という。



天球上での太陽の動き

・黄道と春分点

地球から見た太陽の方向は，約 1 年周期で変化する。天球上での太陽の通り道を**黄道**と呼ぶ。

地球の赤道面は公転面と一致せず約（23° ／ 67°）傾いているため，太陽の見える方向は東西だけでなく南北にも変化する。黄道が天の赤道を南側から北側へと横切る点を**春分点**という。

覚えておこう

天球上での春分点の定義は左の通りですが，そのときの公転軌道上における地球の位置も春分点と呼ばれます。

・**赤道座標**

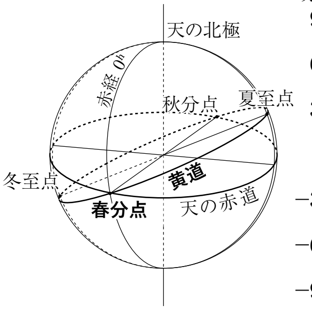
天球上の位置を，地球上の緯度と経度に相当する赤緯と赤経によって表すことを考える。これを**赤道座標**と呼ぶ。赤道座標を用いることで，天球上の位置を地図のような平面に表すことができる。

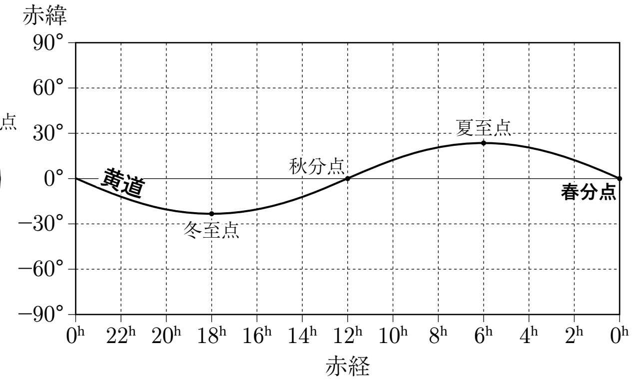
赤緯の基準としては，天の赤道を赤緯 0°とし，天の北極を赤緯 90°とする。また，赤経の基準は春分点とし，東回り〔天の北極側から見て反時計回り〕に角度を測る。ただし，赤経の角度は 15°を 1^h として時間の単位〔h, m, s〕を用いる。

覚えておこう

地図のように表したとき，赤経が右から左に向かって大きくなるように描かれているのはなぜでしょうか。

天球を外側から見ると，左から右に向かって春分点，夏至点，……と並んでいるように見えます。しかし，本来私たちは天球を内側から見るので，右から左に向かって春分点，夏至点，……と並んでいるはずです。図は，そのようすを正しく示すように描かれているのです。





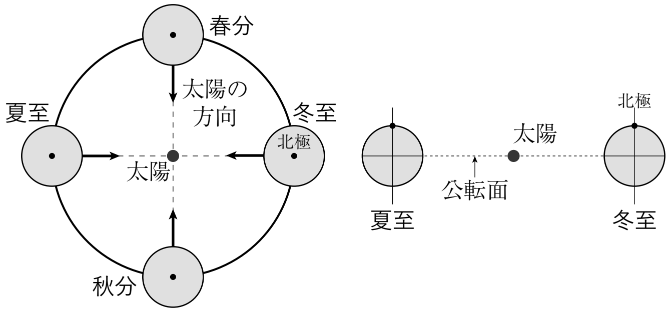
まとめ

・地球の＿＿＿＿と天球との交線を天の赤道という。
・天球上の＿＿＿＿の通り道を黄道という。
・黄道が天の赤道を南から北へと横切る点を＿＿＿＿という。

Chapter2　演習問題

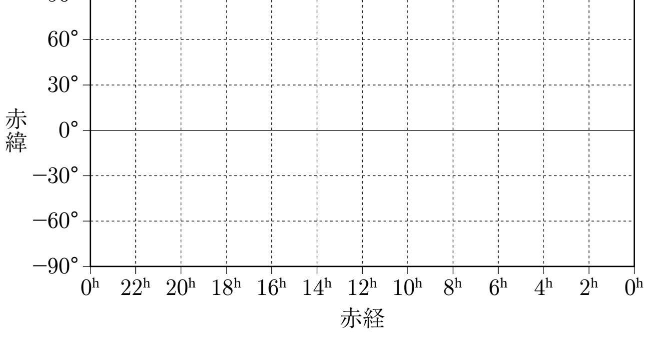
ここでは，地球の公転と天球上での太陽の移動との対応関係について確認しましょう。

問題(1)　次の図は，地球の自転軸が傾いていない仮想的な状態について，地球の公転のようすを描いた模式図です。このときの太陽の動きについて述べた下の文章中の（　　　）について，正しいものを選びましょう。

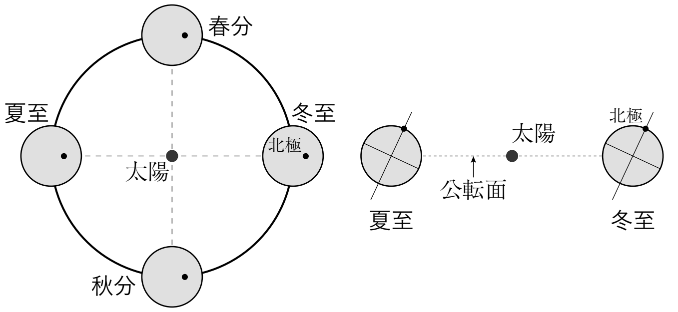


地球の自転軸が傾いていないということは，地球の赤道面と公転面が（直交 / 一致）しているということである。このとき，地球から見た太陽の方向は，地球が公転するとともに北極側から見て（時計回り / 反時計回り），すなわち（東から西 / 西から東）に変化する。また，地球から見ると太陽はつねに（赤道面より北側 / 赤道面上 / 赤道面より南側）にある。

問題(2)　**問題**(1)の文章を参考にして，次の図に地球の自転軸が傾いていないときの黄道を描きましょう。

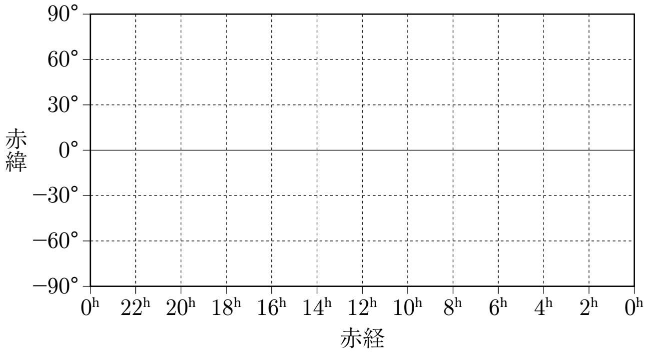


問題(3) 次の図は，地球の自転軸が 23°傾いている状態について，地球の公転のようすを描いた模式図です。このときの太陽の動きについて述べた下の文章中の（　　　）について，正しいものを選びましょう。



地球の自転軸が傾いている場合は，地球の赤道面と公転面が斜めに交わる。このとき，地球から見た太陽の方向は，地球が公転するとともに北極側から見て（時計回り / 反時計回り），すなわち（東から西 / 西から東）に変化する。また，地球から見ると太陽は赤道面をはさんで上下に移動している。 太陽が赤道面より北極側に見えるのは，北半球の（夏 / 冬）である。

問題(4) **問題(3)**の文章を参考にして，次の図に地球の自転軸が 23°傾いているときの黄道を描きましょう。また，黄道上の春分点に●，夏至点に○をつけてください。



第18講 PART3　確認問題

問１　次の文章を読み，下の問いに答えよ。

地球を中心として星を投影する無限に大きな球面を天球とよぶ。地球の赤道面を延長し，天球と交わる交線を(　ア　)，地球の自転軸の延長と天球との交点のうち，北極側の交点を(　イ　)という。

天球上での太陽の通り道を(　ウ　)といい，(　ア　)に対して約 23°傾いている。(　ウ　)と(　ア　)は，天球上の２か所で交差し，(　ウ　)が(　ア　)を南側から北側へ横切る点を(　エ　)という。

天球上の位置は a<u>赤道座標</u>で表され，地球上の緯度に相当する赤緯，経度に相当する赤経が用いられる。

(1)　空欄ア，イに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ア：天の赤道　　イ：天の北極
②　ア：天の赤道　　イ：天の南極
③　ア：地平線　　イ：天の北極
④　ア：地平線　　イ：天の南極

(2)　空欄ウに入る語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　光路　　②　赤道　　③　軌道　　④　黄道

(3)　空欄エに入る語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　春分点　　②　夏至点　　③　秋分点　　④　冬至点

(4) 下線部 a について，春分点の赤道座標として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① 赤緯 $0°$，赤経 0^h

② 赤緯 $0°$，赤経 90^h

③ 赤緯 $90°$，赤経 0^h

④ 赤緯 $90°$，赤経 90^h

PART4 時刻と暦

目標　1 恒星日と 1 太陽日，1 恒星年と 1 太陽年，平均太陽時と視太陽時の違いについて，それぞれ簡潔に説明できる。

Chapter1　1日と1年

日頃何気なく使っている 1 日や 1 年という時間の単位ですが，何を基準とするかで 2 通りの定義があります。ここでは，1 日や 1 年の定義について学びましょう。

1日

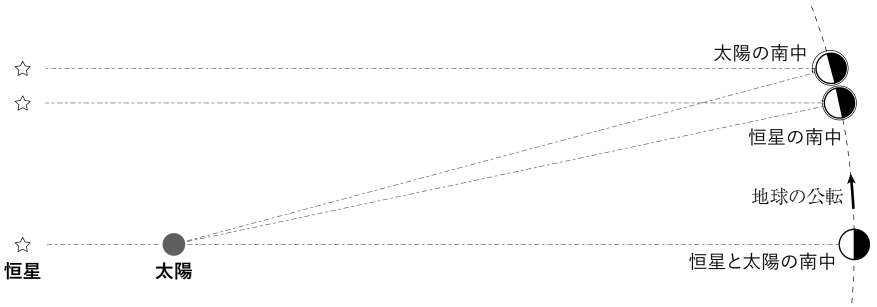
・恒星日

恒星を基準として地球が 1 回自転する時間を **1 恒星日**という。これは，ある恒星が南中してから次に南中するまでの時間のことで，約 23 時間 56 分と等しい。

・太陽日

太陽を基準として地球が 1 回自転する時間を **1 太陽日**という。これは，太陽が南中してから次に南中するまでの時間のことで，24 時間と等しい。時刻や時間の基準となってきたのは，恒星日ではなく太陽日である。

地球が太陽のまわりを自転と（同じ / 逆の）向きに公転しているため，1 太陽日は 1 恒星日より長い。



1年

・**恒星年**

恒星を基準として地球が1回公転する時間を**1恒星年**という。これは，ある恒星と地球，太陽がこの順に一直線上に並んでから次に3つの天体が同じように並ぶまでの時間のことで，約365.256日と等しい。

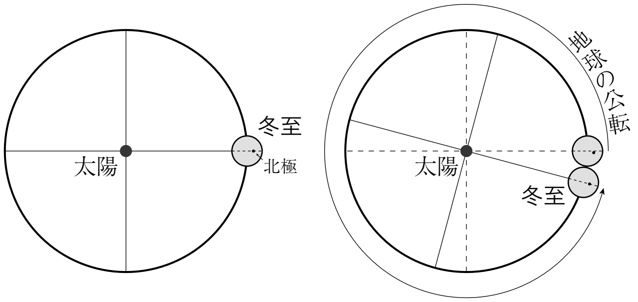
・**太陽年**

春分点を基準として地球が1回公転する時間を**1太陽年**という。これは，地球が春分点を通過してから次に春分点を通過するまでの時間のことで，約365.242日と等しい。暦の基準となってきたのは，恒星年ではなく太陽年である。

地球の自転軸の傾く向きが地球の公転と（同じ / 逆の）向きに回転する**歳差運動**が起こっているため，1太陽年は1恒星年より短い。

知っておこう

自転軸の傾く向きが変化するということは，地球の公転軌道のどの位置でどの季節になるかが変化する，ということです。これにより春分点の位置が変化するため，恒星を基準としたときの公転周期と春分点を基準としたときの公転周期は異なるのです。



まとめ

・1恒星日は恒星，1太陽日は太陽を基準にした地球の自転周期であり，地球が自転と________向きに________しているため，__________の方が短い。

・1恒星年は恒星，1太陽年は春分点を基準にした地球の公転周期であり，地球の公転と________向きの____________が起こっているため，____________の方が短い。

Chapter2　時刻と暦

時刻を知るためには時計，日付を知るためにはカレンダー（暦）を用いることができます。ここでは，時刻や暦がどのように決められているのかを学びましょう。

時刻

・**視太陽日と視太陽時**

実際の太陽が南中する時刻を正午として，正午から次の正午までを**1 視太陽日**という。このような実際の太陽の動きをもとに定めた時刻を**視太陽時**という。

地球の公転軌道が楕円軌道であることや黄道面が公転面と斜交していることの影響により，1 視太陽日の長さは 1 年周期で変化する。

知っておこう

公園や博物館などにある日時計は，視太陽時を知るための道具です。

・**平均太陽日と平均太陽時**

（黄道 / 天の赤道）上を一定の速さで動き，1 太陽年で 1 周する仮想的な太陽を**平均太陽**という。

平均太陽が南中してから次に南中するまでを**1 平均太陽日**といい，平均太陽の動きをもとに定めた時刻を**平均太陽時**という。

・**均時差**

視太陽時から平均太陽時を引いた時間を**均時差**という。

均時差は約 1 年周期で変化する。均時差の絶対値は最大で（15 秒 / 15 分 / 15 時間）程度である。

・**世界時と日本標準時**

経度 0°の子午線を**本初子午線**という。本初子午線で平均太陽が南中する時刻を正午〔12 時〕と定めた時刻を**世界時**という。

日本では東経 135°の子午線で平均太陽が南中する時刻を正午と定めている。この時刻を**日本標準時**といい，世界時より（3 時間 / 9 時間 / 13 時間半）だけ（進んでいる / 遅れている）。

暦

・太陰暦

月の満ち欠けのみを基準として 1 か月を定める暦を太陰暦〔純粋太陰暦〕という。1 か月は 29 日または 30 日，1 年は 12 か月で，春分点の日付が 1 年に約 11 日ずれる。

・太陰太陽暦

太陰暦における春分点の日付のずれは，3 年で約 1 か月に達する。それに合わせてうるう月を挿入することで日付と季節との対応関係を改善させた暦を太陰太陽暦という。

・太陽暦

太陽の見え方をもとに定めた暦を**太陽暦**という。1873 年〔明治 6 年〕以降の日本では，太陽暦の 1 つである**グレゴリオ暦**が用いられている。

太陽暦では，1 太陽年と 365 日とのずれをうるう年によって調整する。グレゴリオ暦では，西暦が 4 で割り切れる年をうるう年とするが，100 で割り切れて 400 で割り切れない年はうるう年としない。

知っておこう

左の本文では「春分点の日付」としていますが，中国や日本で長い間用いられた太陰太陽暦の 1 年の基準は冬至でした。また，冬至だけでなく大寒や処暑といった二十四節気を用いてうるう月を挿入する位置を決定していました。

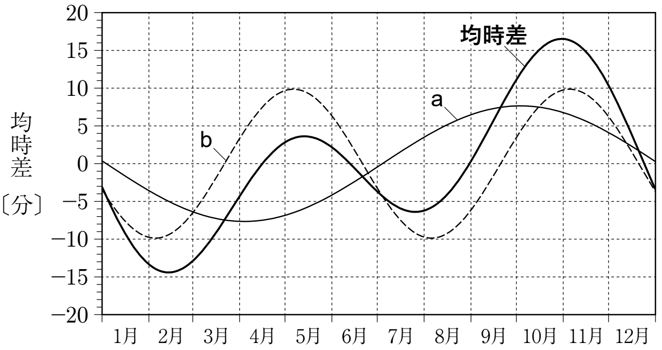
まとめ

- 天の赤道を一定の速度で移動して 1 年で 1 周する仮想的な太陽を＿＿＿＿＿＿といい，その動きをもとに定めた時刻を平均太陽時という。
- 実際の太陽の動きをもとに定めた時刻を視太陽時といい，視太陽時から平均太陽時を引いた時間を＿＿＿＿＿という。
- 現在の日本で用いられている暦は，太陽の見え方をもとに定めた太陽暦の 1 つの＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿である。

Chapter3　演習問題

ここでは，時刻と暦について，具体的な計算をして確認しましょう。

問題(1)　次の図は，2024 年の均時差を表したものです。時刻について述べた下の文章中の（　　　）について，正しいものを選びましょう。また，空欄［ **ア** ］～［ **ケ** ］に入る数値をいずれも整数で答えましょう。



均時差は平均太陽時と視太陽時のずれを表しており，視太陽時の方が（進んでいる ／ 遅れている）とき正の値をとる。均時差が生じる原因のうち，楕円軌道であることの影響は（近日点と遠日点 ／ 二至二分）で 0 となる（a ／ b）の曲線で表され，赤道面が公転面と斜交していることの影響は（近日点と遠日点 ／ 二至二分）で 0 となる（a ／ b）の曲線で表される。

ここでは，11 月 15 日の太陽について考えよう。この日に東経 140°の子午線上で太陽が南中して見えたとき，視太陽時は［ **ア** ］時［ **イ** ］分である。グラフより均時差は約［ **ウ** ］分なので，このときの平均太陽時は［ **エ** ］時［ **オ** ］分である。さらに，日本標準時は東経［ **カ** ］°の子午線上における平均太陽時なので，東経 140°の子午線上における平均太陽時よりも［ **キ** ］分だけ（進んで ／ 遅れて）いる。すなわち，東経 140°の子午線上で太陽が南中して見えたのは，日本標準時で［ **ク** ］時［ **ケ** ］分のことである。

知っておこう

冬至，夏至，春分，秋分をあわせて二至二分といいます。

問題(2) 暦について述べた次の文章中の空欄［ **コ** ］～［ **ツ** ］に入る数値を，［ **コ** ］～［ **シ** ］,［ **ツ** ］は小数第 4 位までの小数，［ **ス** ］～［ **チ** ］は整数でそれぞれ答えましょう。

太陽の見え方をもとに定めた暦を太陽暦という。古代エジプト暦では，1 年の日数を 1 太陽年に最も近い整数である 365 日で一定と定めていた。しかし，1 太陽年は 365.2422 平均太陽日であり，1 平均太陽日の整数倍ではない。そのため，古代エジプト暦では春分点の日付が少しずつずれてしまう。これをどのように修正するのかが，暦法ごとに異なっている。

連続する 4 年間の合計は［ **コ** ］平均太陽日であり，365 日の 4 倍に 1 日を加えたものに近い。よって，4 年に 1 回，1 年を 366 日とするうるう年を設ければ，春分点の日付のずれは小さく抑えられる。これが紀元前 45 年にローマのユリウス・カエサルが導入したユリウス暦であり，ユリウス暦では連続する 4 年間で平均した 1 年の日数が［ **サ** ］日である。

1582 年にローマ教皇グレゴリオ 13 世によって導入されたグレゴリオ暦は，ユリウス暦を改良したものである。グレゴリオ暦は，連続する 400 年間の合計が［ **シ** ］平均太陽日であり，365 日の 400 倍に［ **ス** ］日を加えたものに近いことに着目した暦である。ユリウス暦では 400 年間に［ **セ** ］年のうるう年があるが，これでは［ **ソ** ］年だけうるう年が多すぎる。そこで，西暦が［ **タ** ］で割り切れて［ **チ** ］で割り切れない年をうるう年の対象から除外することにした。これにより，連続する 400 年間で平均した 1 年の日数は［ **ツ** ］日となる。

長年にわたって太陰太陽暦が用いられていた日本でも，グレゴリオ暦は旧暦の明治 5 年 12 月 3 日を新暦の明治 6 年 1 月 1 日に置き換える形で導入され，現在も用いられている。

第18講 PART4　確認問題

問 1　次の文章を読み，下の問いに答えよ。

1 日や 1 年の定義には 2 種類ある。地球が恒星を基準として 1 回自転する時間を 1（　ア　）という。それに対して，地球が太陽を基準として 1 回自転する時間を 1（　イ　）という。また，地球が恒星を基準として 1 回公転する時間を 1（　ウ　）という。それに対して，地球が春分点を基準として 1 回公転する時間を 1（　エ　）という。

(1)　空欄ア～エに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ア：太陽日　イ：恒星日　ウ：太陽年　エ：恒星年
②　ア：恒星日　イ：太陽日　ウ：恒星年　エ：太陽年
③　ア：太陽年　イ：恒星年　ウ：太陽日　エ：恒星日
④　ア：恒星年　イ：太陽年　ウ：恒星日　エ：太陽日

(2)　1 恒星日と 1 太陽日の長さの関係として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　1 恒星日は 1 太陽日より約 4 秒長い。
②　1 恒星日は 1 太陽日より約 4 分長い。
③　1 恒星日は 1 太陽日より約 4 秒短い。
④　1 恒星日は 1 太陽日より約 4 分短い。

(3)　1 太陽年は 1 恒星年よりやや短い。これは，地球の自転軸が傾く向きが地球の公転と逆向きに周期的に回転しているためである。この自転軸の運動を何というか。最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　直線運動　　②　らせん運動
③　歳差運動　　④　放物運動

問2 次の文章を読み，下の問いに答えよ。

天の赤道上を一定の速さで動き1太陽年で1周する仮想的な太陽を考え，この仮想的な太陽が南中してから次に南中するまでの時間を1（　オ　）といい，このようにして求めた時刻を（　カ　）という。これに対して，実際の太陽の動きをもとに定めた時刻を（　キ　）という。

(1) 空欄オ～キに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

	オ	カ	キ
①	オ：平均太陽日	カ：平均太陽時	キ：視太陽時
②	オ：平均太陽日	カ：平均太陽時	キ：世界時
③	オ：視太陽日	カ：視太陽時	キ：平均太陽時
④	オ：視太陽日	カ：視太陽時	キ：世界時

(2) 空欄カとキの時間差を何というか。最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　時差　　②　歳差　　③　均時差　　④　視差

問3 次のク～コの説明にあてはまる暦の組合せとして最も適当なものを，下の①～④のうちから一つ選べ。

ク　月の満ち欠けを基準として1か月を定める暦

ケ　太陽の見え方をもとに定めた暦

コ　太陰暦に，うるう月を挿入して日付と季節の対応関係を改善した暦

	ク	ケ	コ
①	ク：太陰暦	ケ：太陽暦	コ：太陰太陽暦
②	ク：太陰暦	ケ：太陰太陽暦	コ：太陽暦
③	ク：太陰太陽暦	ケ：太陰暦	コ：太陽暦
④	ク：太陽暦	ケ：太陰暦	コ：太陰太陽暦

PART5 惑星の視運動

目標　惑星の視運動について，地球と惑星の位置関係と関連付けて説明できる。

Chapter1　惑星の視運動

惑星という単語には「惑」という文字が用いられています。ここでは，その由来にもなった，惑星の視運動の特徴について学びましょう。

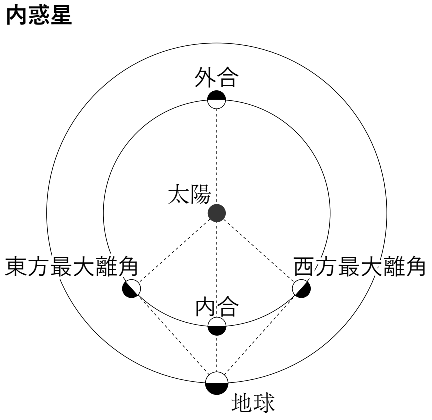
地球と惑星の位置関係

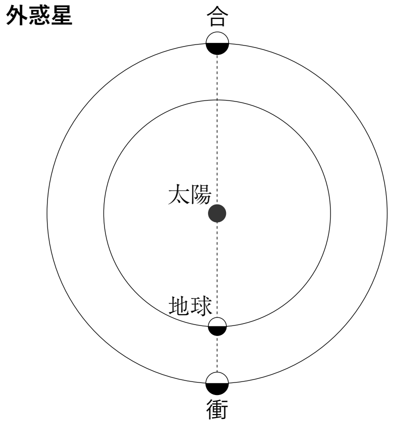
・**内惑星と外惑星**

地球より公転半径の小さい惑星を**内惑星**，公転半径の大きい惑星を**外惑星**という。

・**地球と惑星の位置関係**

内惑星と外惑星で，特徴的な位置関係やその名称が異なる。



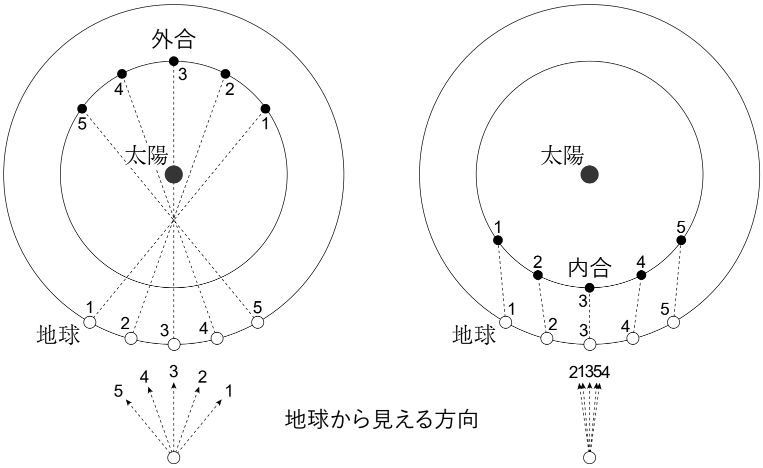


惑星の視運動

・**惑星の公転軌道面と天球上の軌道**

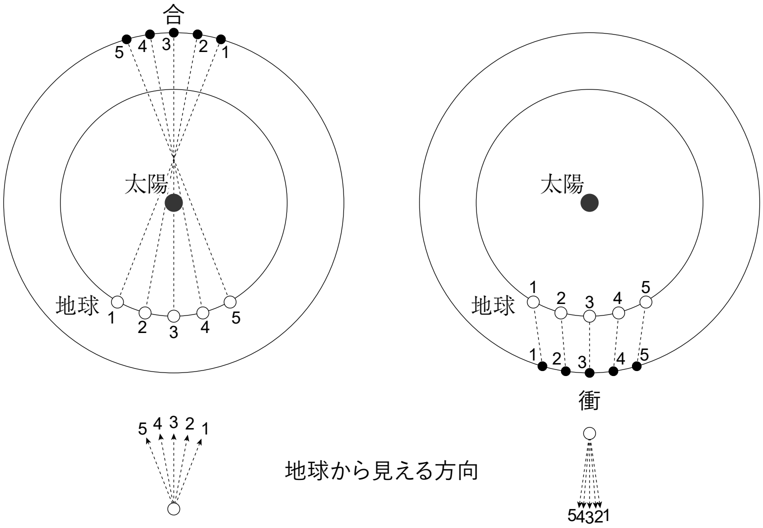
太陽系の惑星の公転軌道面どうしのなす角は小さい。つまり，惑星は地球の公転軌道面の近くを公転している。よって，惑星は（天の赤道 / 黄道）の近くを運動するように見える。

・**内惑星の視運動**



→通常は西から東〔北半球から見て右から左〕へと順行し，（内合 / 外合）の前後では東から西〔北半球から見て左から右〕へと逆行する。

・**外惑星の視運動**



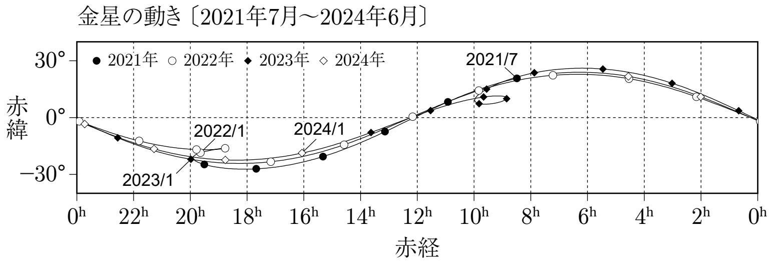
→通常は西から東へと順行し，（合 / 衝）の前後では東から西へと逆行する。

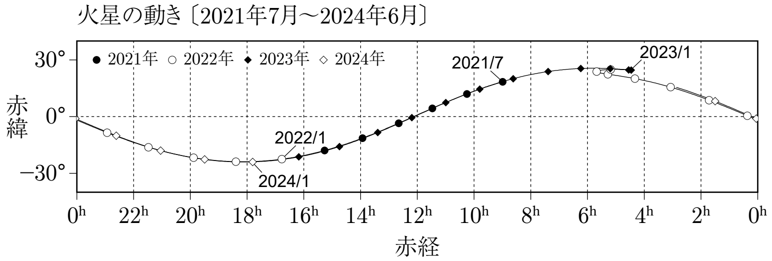
まとめ

・惑星は天球上を______から______に向かって運動する期間が長く，このような向きの運動を________という。
・内惑星では______，外惑星では______の前後に限り惑星の運動が逆向きになるように見えて，このような向きの運動を________という。

Chapter2　演習問題

次の図は, 2021 年 7 月から 2024 年 6 月までの金星と火星の動き〔各月の 1 日における位置〕を赤道座標によって表したものです。ここでは，この図を用いて惑星の運動について確認しましょう。





問題⑴　金星の動きについて述べた次の文章中の（　　　）について，正しいものを選びましょう。

赤経は，春分点の赤経を（0^h / 12^h)，360° を 24^h として天球上の位置を角度で表したものである。よって，太陽は春分，すなわち 3 月 21 日ごろに赤経 0^h にあり，1 か月ごとに約 (1^h / 2^h / 3^h) ずつ図中の右から左へと移動する。

金星の動きに着目すると，2022 年 1 月頃に金星が赤経 20^h から 19^h へと逆行している。1 月の太陽は赤経（6^h ~ 8^h / 18^h ~ 20^h）にあるので，金星と太陽は同じ方向にあるといえる。また，金星と太陽が次に同じ方向にある時期を調べると，(2022 年 10 月 / 2023 年 8 月) 頃である。このときは，金星が順行している。

金星と太陽が同じ方向にある状態のうち，金星が逆行するのは（外合 / 内合)，順行するのは（外合 / 内合）のときである。上の図によると，外合から次の外合まで，内合

から次の内合までの時間はいずれも（8か月 / 19か月）程度である。

問題⑵　火星の動きについて述べた次の文章中の（　　　）について，正しいものを選びましょう。

火星は2022年12月頃に逆行している。このとき火星の赤経と太陽の赤経は（ほぼ同じ / 約12h異なる）ため，火星と太陽は地球から見て（同じ / 正反対の）方向にある。この状態を衝という。

一方，合の時期を調べると，2021年10月頃と（2023年11月 / 2024年3月）頃の2回が確認できる。よって，合から次の合までの時間は(25か月 / 29か月)程度である。

問題⑶　惑星の動きについて述べた次の文章中の空欄［　**ア**　］～［　**カ**　］に入る式を答えましょう。

問題⑴や問題⑵で考えたような，2つの惑星の位置関係が同じになる周期を会合周期という。

内側を公転周期 P_A〔年〕で公転している惑星**A**と，外側を公転周期 P_B〔年〕で公転している惑星**B**について考える。太陽―**A**―**B**がこの順に一直線上に並んでから，次に同じ状態になるまでの時間を t〔年〕とする。これが**A**と**B**の会合周期である。

Aの公転の角速度は［　**ア**　］周 / 年，**B**の公転の角速度は［　**イ**　］周 / 年である。よって，t〔年〕の間に**A**は［　**ウ**　］周，**B**は［　**エ**　］周だけ公転する。

ここで，内惑星は外惑星を追い抜くので，t〔年〕の間に**A**は**B**よりちょうど1周だけ多く公転する。このことから，

［　ウ　］－［　エ　］＝［　**オ**　］

すなわち

$$\frac{1}{t} = [\quad \textbf{カ} \quad]$$

が成り立つことがわかる。

第 18 講　PART5　確認問題

問 1　地球と惑星の位置関係について，次の問いに答えよ。

(1) 内惑星が太陽と地球を結ぶ直線上で太陽と地球の間にあるときを何というか。最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　外合　②　内合　③　合　④　衝

(2) 外惑星が太陽と地球を結ぶ直線上で太陽側にあるときを何というか。最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　外合　②　内合　③　合　④　衝

問 2　惑星の視運動について，次の問いに答えよ。

(1) 惑星の順行とは天球上のどのような動きのことか。最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　東から西への動き

②　西から東への動き

③　北から南への動き

④　南から北への動き

(2) 内惑星，外惑星の逆行が見られるときの組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　内惑星：内合　外惑星：合

②　内惑星：内合　外惑星：衝

③　内惑星：外合　外惑星：合

④　内惑星：外合　外惑星：衝

< Note >

第 19 講　太陽系の天体

PART1 太陽の構造

目標　太陽の大きさと内部構造について，それぞれ簡潔に説明できる。

Chapter1　太陽の構造

太陽は地球から最も近い恒星であると同時に，宇宙にごくありふれた恒星の 1 つであることがわかっています。ここでは，太陽の大きさや内部構造について学びましょう。

太陽の大きさ

・**太陽の見かけの大きさ**

ある地点から天体を見たときの直径や半径を角度で表したものを，それぞれ**視直径**，**視半径**という。太陽の視直径は，平均約（32″ / 32′）である。

・**太陽の真の大きさ**

	太陽	地球	太陽÷地球
半径	7.0×10^5 km	6.4×10^3 km	（11 / 110）

太陽の内部

・**太陽の質量と平均密度**

	太陽	地球	太陽÷地球
質量	2.0×10^{30} kg	6.0×10^{24} kg	（33 / 33 万）
平均密度	1.4×10^3 kg/m^3	5.5×10^3 kg/m^3	0.26

・**太陽を構成する元素**

質量比でみると，約 7 割が（水素 / ヘリウム / 鉄），約 3 割が（水素 / ヘリウム / 鉄）である。

・**核融合**

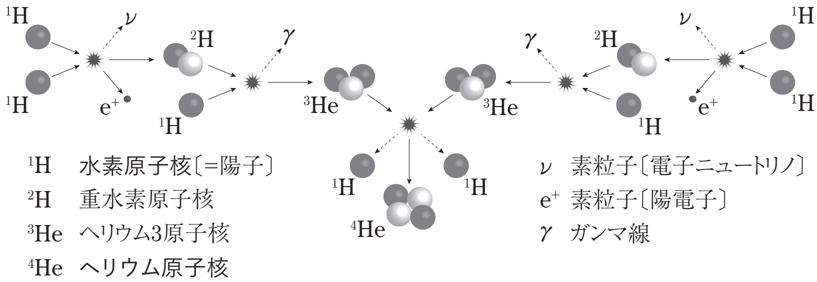
約（100 万 K / 1000 万 K）以上の高温条件では，次のような水素の核融合が起こる。

知っておこう

天文分野で扱われる長さや大きさは，地球や太陽の値との比として求められたものが多くあります。また，値が大きすぎて単位を m や kg にしてもイメージしにくいものがほとんどです。
基準となるものの値を頭に入れたうえで，その何倍なのかを意識するとよいでしょう。

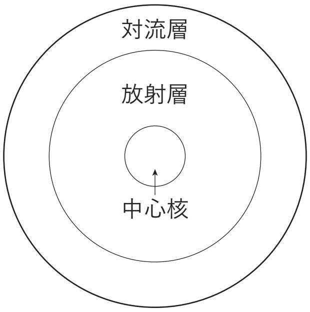
知っておこう

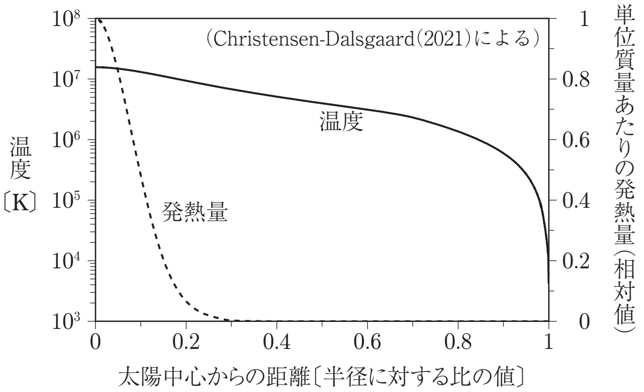
核融合では元となる原子核の質量の和よりも生成された原子核の質量の方が小さく，その質量の差がエネルギーへと変化されます。



→反応全体では，（2つ / 4つ / 6つ）の水素原子核が1つのヘリウム原子核へと変化する。

・**太陽の内部構造**





→太陽の中心核では水素の核融合が起こり，そのエネルギーがはじめおもに放射，その後はおもに対流により表面へと伝わる。

まとめ

・太陽の半径は，地球の半径の約_____倍である。

・太陽は質量の約7割を_____が占める。

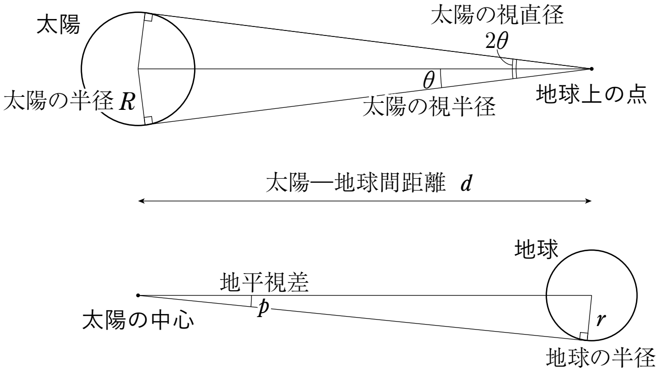
・太陽の中心核では____個の水素原子核が1個の_______原子核となる_______が起こっている。

・エネルギーの伝わり方の違いにより，太陽の中心核のすぐ外側は_____層，その外側は_____層と呼ばれる。

Chapter2　演習問題

ここでは，太陽の大きさと内部構造について確認しましょう。

問題(1)　次の図は，太陽の半径を推定する方法に関する模式図です。太陽の半径について述べた下の文章中の空欄［　**ア**　］～［　**ウ**　］に入る式を θ, p, R, r, d のうち必要なものを用いて答えましょう。



太陽を地球から見たときの見かけの直径を角度で表したものを視直径という。また，その半分にあたる角を視半径という。

ある天体を地球の中心から見た方向と地上の観測点から見た方向のずれを地心視差という。特に，地上の観測点から見て天体が地平線上にあるときの地心視差を地平視差という。

上の図中の直角三角形について三角比を考えると，

$\sin\theta =$［　**ア**　］

$\sin p =$［　**イ**　］

が成り立つ。

視半径や地平視差は微小な角であり，微小な角 a について

$\sin a = a$

と近似できる〔ただし，角は弧度法で表す〕ことを用いると，

$\dfrac{R}{r} =$［　**ウ**　］

と表せる。

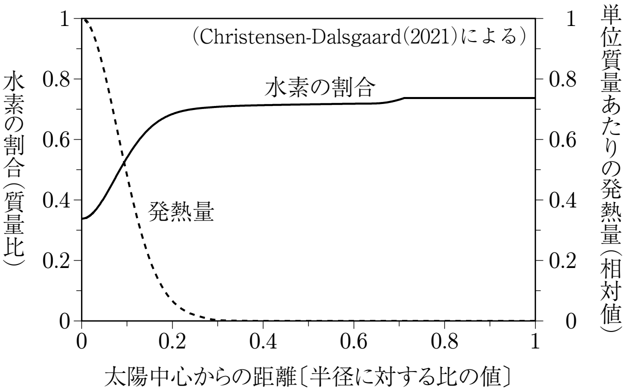
知っておこう

微小な角 a について　$\sin a = a$ と近似できることは，図中の直角三角形を扇形で近似できる，と言い換えることもできます。

確かに，地球と太陽は遠く離れているので，太陽の中心から地球の中心までの距離と，太陽の中心から地表の点までの距離はほぼ等しいと考えてもよさそうですね。

問題(2) 太陽の地平視差を 8.9″，太陽の視直径を 32′ とします。太陽の半径は地球の半径の何倍か，上から 2 桁の概数で答えましょう。

問題(3) 次の図は，太陽中心からの距離と，その地点における水素の割合や単位質量あたりの発熱量との関係を表しています。太陽の内部構造について述べた下の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。



上の図からは，太陽中心の近くでのみ発熱が起こっていることが読み取れる。また，この発熱が起こっている領域では，その外側より水素の割合が小さくなっている。

太陽の中心付近では温度が約（6000 K ／ 1000 万 K）に達し，水素の原子核（2 つ ／ 4 つ）が（ヘリウム ／ 鉄）の原子核 1 つになる（核分裂 ／ 核融合）が起こっている。この反応は水素を消費して大きなエネルギーを放出するため，上の図に示されるような水素の割合や発熱量の分布になっていると考えることができる。

中心付近で放出されたエネルギーは，太陽半径の 0.7 倍程度までおもに（対流 ／ 放射），その外側ではおもに（対流 ／ 放射）により伝わる。表面まで伝わったエネルギーは，（可視光線 ／ 赤外線）の領域でエネルギーが最大となる電磁波として宇宙空間に放射されている。

第 19 講　PART1　確認問題

問 1　次の文章を読み，下の問いに答えよ。

　太陽は地球から最も近い恒星である。太陽の半径は約（　ア　）km で地球の約（　イ　）倍，質量は約（　ウ　）kg で，地球の約（　エ　）倍である。

(1)　空欄ア，イに入る数値の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ア：7.0×10^{5}　　イ：110

②　ア：7.0×10^{5}　　イ：1100

③　ア：7.0×10^{8}　　イ：110

④　ア：7.0×10^{8}　　イ：1100

(2)　空欄ウ，エに入る数値の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

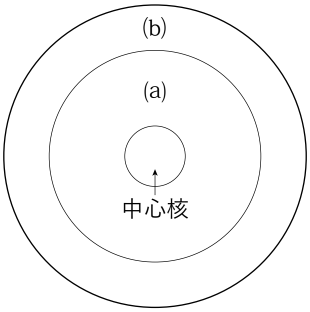
①　ウ：2.0×10^{30}　　エ：3300

②　ウ：2.0×10^{30}　　エ：33 万

③　ウ：2.0×10^{33}　　エ：3300

④　ウ：2.0×10^{33}　　エ：33 万

問2　次の図は，太陽の内部構造を示したものである。下の問いに答えよ。



(1)　太陽の中心核で起こっている核融合として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① 1つのヘリウム原子核が2つの水素原子核に変わる。
② 1つのヘリウム原子核が4つの水素原子核に変わる。
③ 2つの水素原子核が1つのヘリウム原子核に変わる。
④ 4つの水素原子核が1つのヘリウム原子核に変わる。

(2)　太陽の構造として，(a)と(b)の部分の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① (a) 放射層　(b) 対流層
② (a) 放射層　(b) 伝導層
③ (a) 対流層　(b) 放射層
④ (a) 対流層　(b) 伝導層

PART2 太陽の表層

目標　太陽の表層の代表的な構造を挙げ，名称とその特徴をそれぞれ説明できる。

Chapter1　太陽の表層

太陽は非常に明るい1つの円盤のように見えますが，詳しく観測するとさまざまな構造が存在することがわかります。ここでは，太陽の表層の構造について学びましょう。

太陽の光球

・**光球**

恒星を電磁波で観測したときの表面にあたる層を**光球**という。

太陽の光球の温度は約6000K，厚さは400 ~ 500km である。

・**黒点**

光球上にあって黒く見える斑点状の構造を**黒点**という。黒点は周囲より1500 ~ 2000K 程度（高温 / 低温）であり，放射する電磁波のエネルギーが小さいため暗く見える。

黒点は磁力線の束が太陽表面を貫く部分にあたる。そのため，ここでは強い磁場の影響で対流運動が抑えられ，深部からの高温の物質の湧き上がりが少ないため低温になると考えられている。

・**白斑**

光球上にあって白く見える斑点状の構造を**白斑**という。白斑は周囲より100 ~ 200K 程度（高温 / 低温）である。

・**粒状斑**

光球全体にみられる細かい粒状の模様を**粒状斑**という。粒状斑は，光球における細かい対流のようすを上から見たものである。

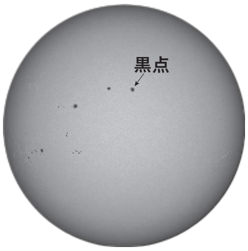
知っておこう

光球の温度は一定ではなく，外側に向かって低温になっていきます。そのため，光球の外側の部分を見ることになる太陽の外縁部は暗く見えます。この現象を**周辺減光**と呼びます。

知っておこう

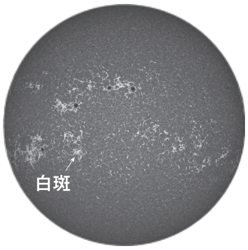
太陽の表面付近には，Ω状になった磁力線の束が形成されます。これが光球を貫く部分が黒点なので，黒点はしばしば2つが対になって形成されます。

可視光線〔波長450nm〕



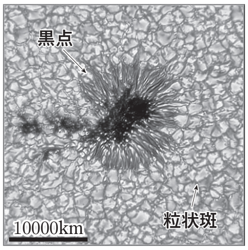
(NASA)

紫外線〔波長170nm〕



(NASA)

可視光線〔波長450nm〕



(NSF/AURA/NSO)

※ 右の可視光線画像は他と異なる日時に観測されたもの

知っておこう

太陽大気は光球より高温ではあるものの，極めて希薄であり，通常私たちが意識することはありません。月が太陽を隠す皆既日食のときには，月の周りに希薄な大気が輝いているようすを確認できます。

太陽大気

・彩層とプロミネンス

光球の上には，温度が約 10000K，厚さ数千 km 程度の大気層がある。これを**彩層**という。彩層では，炎のような構造である**プロミネンス**が見られることがある。

知っておこう

プロミネンスが光球中心付近で生じると黒っぽい筋のように見えることがあり，これをフィラメントと呼びます。

・コロナ

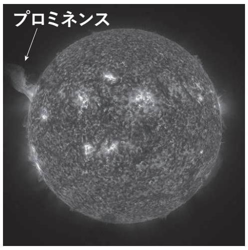
彩層の上には温度が 100 万 K を超える希薄な大気層があり，これを**コロナ**という。コロナは太陽半径の 10 倍以上まで広がる。

コロナを観測したときに暗く見える部分を**コロナホール**といい，ここからはおよそ秒速 800km の高速の太陽風が吹き出している。

知っておこう

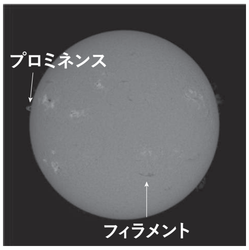
コロナホールは磁力線の束が光球を貫く部分だという点が黒点と共通しています。ただし，黒点の場合は光球から出た磁力線が別の黒点で光球に戻ってくるのに対して，コロナホールの場合は磁力線が太陽に戻らず，遠方まで伸びていきます。高速の太陽風は，これに沿って 100 天文単位以上の遠方まで流れていくのです。

紫外線〔波長30nm〕



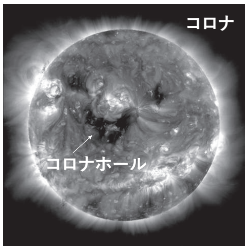
(NASA)

可視光線〔波長656nm：Hα線〕



(NASA)

紫外線〔波長19nm〕



(NASA)

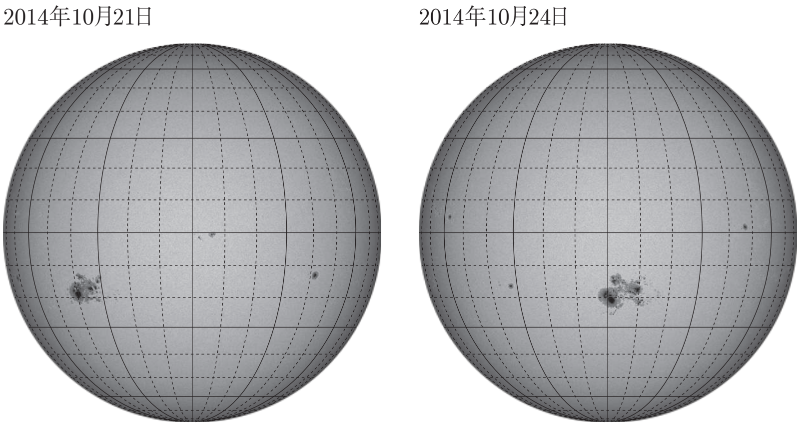
※ すべて異なる日時に観測されたもの

まとめ

- 恒星を電磁波で観測したときの表面を______という。
- 太陽表面にある斑点状の構造のうち，周囲より低温で黒っぽいものを______，高温で白っぽいものを______という。
- 太陽表面全体にある小さな粒状の模様を________という。
- 太陽大気のうち，表面直上の薄い層を______，その上にあって太陽半径の 10 倍以上に広がる層を________という。

Chapter2　演習問題

次の図は，ある 2 日の同じ時刻の太陽表面のようすを地球上空から可視光線で観測して得られた画像です。ここでは，この図を用いて太陽の自転について考えてみましょう。ただし，図は上が北であり，図中には位置の目安として 10° ごとに線が引かれ，30° ごとに実線となっています。



(NASA)

問題(1)　この図について述べた次の文章中の（　　　）について，正しいものを選びましょう。また，空欄［ **ア** ］・［ **イ** ］に入る数値を上から 2 桁の概数で答えましょう。

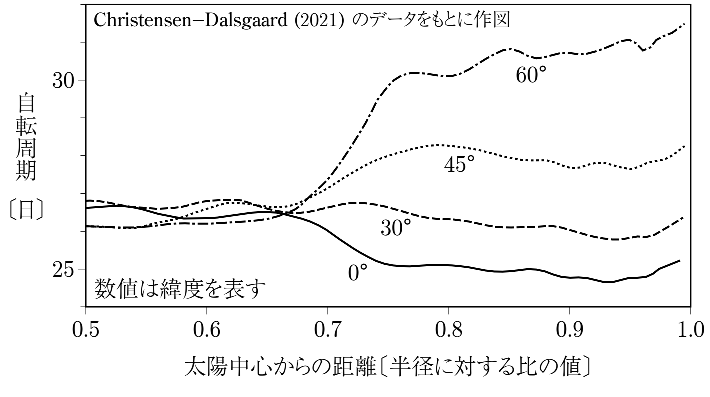
太陽の直径は地球の直径の約（11 / 110）倍である。よって，円周率を 3.1 とすると，太陽の子午線 1 周の長さは地球の直径の約［ **ア** ］倍であり，太陽の子午線方向の角度 1° は地球の直径の約［ **イ** ］倍である。したがって，10 月 24 日の画像の中心のやや下に見られる黒点群のうち最も大きな黒点は，地球より（大きい / 小さい）といえる。

問題⑵ 黒点の移動について述べた次の文章中の（　　　）について，正しいものを選びましょう。また，空欄［　**ウ**　］～［　**オ**　］に入る数値を整数で答えましょう。

10月24日の画像の中心のやや下に見られる黒点群は，10月21日から10月24日までの3日間で約（30° / 40° / 60°）移動して見える。よって，この黒点群の移動速度が太陽の自転速度と一致していると考えると，地球から見た太陽の自転周期は約［　**ウ**　］日である。

ただし，この3日間で地球は太陽のまわりを約（1° / 3° / 15°）だけ公転している。そのため，この3日間における恒星を基準としたときの黒点の移動量は約［　**エ**　］°であり，恒星を基準としたときの太陽の自転周期は約［　**オ**　］日と求められる。

問題⑶ 次の図は，太陽中心からの距離と，その地点における自転周期との関係を表しています。太陽の自転について述べた下の文章中の（　　　）について，正しいものを選びましょう。



（放射層 / 対流層）における自転速度は，緯度によらずほぼ等しい。しかし，その外側における自転速度は高緯度になるほど（大きい / 小さい）。自転速度がこのような分布となっている理由は，今のところ完全には解明されていない。

第19講　PART2　確認問題

問1　次のア～ウの説明にあてはまる太陽の光球上に見られる構造の組合せとして最も適当なものを，下の①～④のうちから一つ選べ。

ア　光球上にあって周囲より 100 ～ 200 K 程度高温である。

イ　光球上にあって周囲より 1500 ～ 2000 K 程度低温である。

ウ　光球における細かい対流のようすを上から見たものである。

① ア：白斑　イ：粒状斑　ウ：黒点
② ア：黒点　イ：粒状斑　ウ：白斑
③ ア：黒点　イ：白斑　ウ：粒状斑
④ ア：白斑　イ：黒点　ウ：粒状斑

問2　次の文章を読み，下の問いに答えよ。

太陽の光球のすぐ外側には温度約 10000 K，厚さ数千 km 程度の（　エ　）という大気層があり，（　エ　）の外側には温度が（　オ　）K を超える（　カ　）という希薄な大気層がある。

(1)　空欄エ～カに入る語句や数値の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① エ：彩層　オ：100 万　カ：コロナ
② エ：彩層　オ：1000 万　カ：コロナ
③ エ：コロナ　オ：100 万　カ：彩層
④ エ：コロナ　オ：1000 万　カ：彩層

⑵　空欄エの大気層に見られる炎のような構造を何というか。最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　コロナホール　　②　フィラメント

③　太陽風　　④　プロミネンス

PART3 太陽活動の地球への影響

目標

黒点数と太陽活動の関係や，フレアが発生したときに地球にどのような影響が及ぼされるかについて，それぞれ簡潔に説明できる。

Chapter1　太陽活動の地球への影響

太陽は安定して輝く恒星ですが，その活動には多少の変動も見られます。ここでは，太陽活動の変動と，その地球への影響について学びましょう。

太陽活動の周期的な変動

・黒点数と太陽活動

黒点数は太陽の磁気的な活動の強さを表すため，黒点数が多いほど太陽活動は（活発な / 穏やかな）時期にあたるといえる。

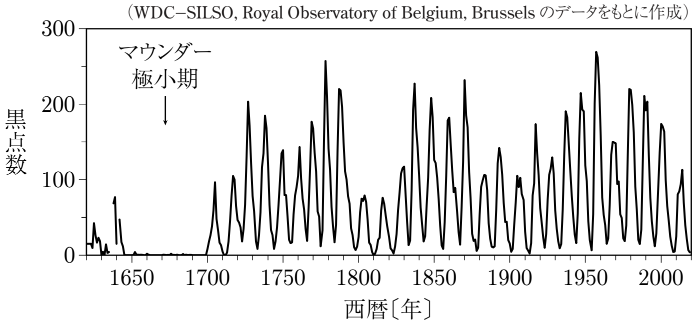
太陽活動の変化が地球の気候にどのように，また，どの程度影響を与えているかは，今のところよくわかっていない。

・黒点数の変動

太陽の黒点数は, 平均約(2 年 / 11 年)周期で増減している。

黒点数にはさらに長い周期の変動も存在するほか，黒点がほとんど存在しない時期が数十年間にわたって続くこともある。

（WDC−SILSO, Royal Observatory of Belgium, Brussels のデータをもとに作成）



知っておこう

17 世紀後半のマウンダー極小期には地球がやや寒冷な環境でしたが，平均気温の低下は 1℃未満でした。

太陽の突発的な現象

・フレア

太陽大気が爆発的に輝く現象を**フレア**という。フレアはおもに黒点付近の上空で見られる。

・デリンジャー現象

フレアでは強いX線や紫外線などの電磁波が放出され，地球の（成層圏 / 電離圏）に影響を与える。これによって生じる通信障害を**デリンジャー現象**という。

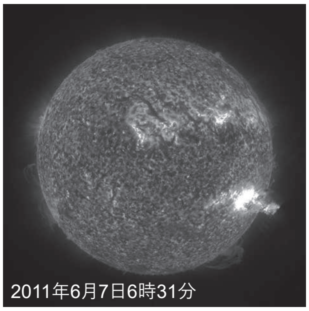
・コロナ質量放出

コロナ中のプラズマが突発的に宇宙空間へと放出される現象を**コロナ質量放出**といい，フレアとともに発生することが多い。

知っておこう

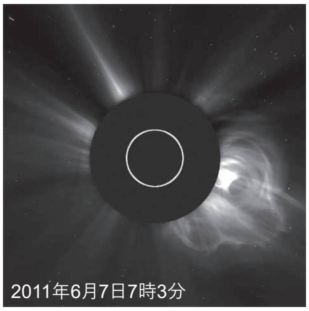
フレアはコロナが磁気エネルギーによって1000万Kを超える高温へと急激に加熱されることで生じます。フレアのきっかけはコロナ内の現象ですが，このときコロナから伝わったエネルギーによって彩層も明るく輝きます。

紫外線〔波長30nm〕



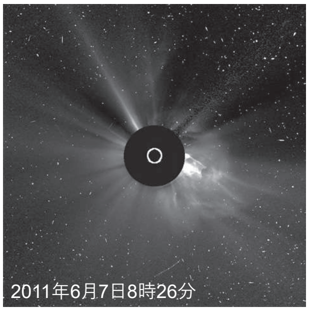
(NASA/SDO)

可視光線〔コロナグラフ〕



(NASA/SOHO)

可視光線〔コロナグラフ〕



(NASA/SOHO)

※ コロナグラフの中央の白い円は太陽の位置と大きさを表す。その外側の黒い部分は,太陽を隠すための円盤の影。

・磁気嵐

コロナ質量放出による密度の大きな太陽風が地球に到達すると，地球磁気圏の突発的な変化である**磁気嵐**を引き起こすことがある。

まとめ

・太陽の黒点数は平均約＿＿＿＿年周期で増減し，黒点の多い時期は太陽活動の＿＿＿＿＿な時期にあたる。

・太陽大気が爆発的に輝く現象を＿＿＿＿＿＿といい，このとき放出された強いX線や＿＿＿＿線が地球に達すると，通信障害である＿＿＿＿＿＿＿＿＿を引き起こすことがある。

・コロナ中のプラズマが突発的に宇宙空間へと放出される現象を＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿といい，地球磁気圏の突発的な変化である＿＿＿＿＿＿を引き起こすことがある。

知っておこう

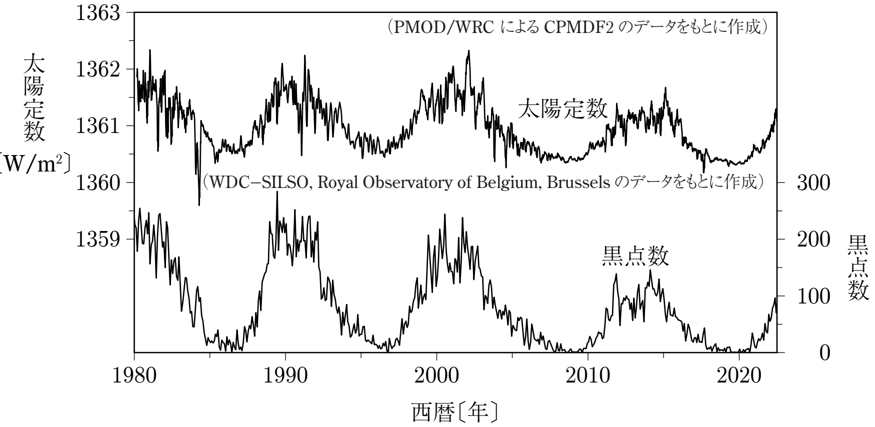
私たちの生活に電波や電気は欠かせないものになっており，地球の電離圏や磁気圏の変動は生活にも影響を与えることがあります。

たとえば，大規模なフレアが発生すると，GNSSによる測位に誤差が生じたり，磁気嵐によって電力網に異常が発生したりすることがあります。

このような障害のおそれを予測することを宇宙天気予報といい，おもに太陽の観測データをもとに日々発表されています。

Chapter2　演習問題

次の図は，太陽定数と黒点数の変動を表しています。ここでは，太陽活動の変動について確認しましょう。



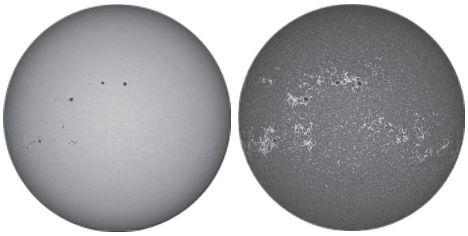
問題⑴　太陽定数について述べた次の文章中の（　　　）について，正しいものを選びましょう。

太陽定数は，地球の（大気上端 / 対流圏界面）において，太陽放射に垂直な単位面積が単位時間に受ける太陽放射のエネルギーである。上の図からは，太陽定数が 10 年よりやや（長い / 短い）周期で変動していることが読み取れる。変動の振幅は，太陽定数の値の（0.1% / 1% / 10%）程度である。

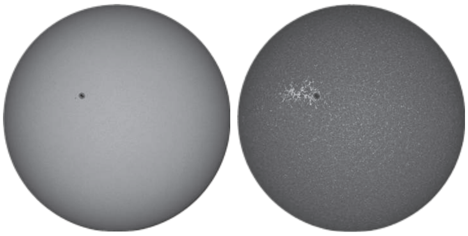
ここで，上の図に示されている太陽定数は，観測された値を地球と太陽との距離が 1 天文単位のときの値に換算したものである。地球の公転軌道の離心率を 0.02 とすると，地球の遠日点距離は近日点距離の約（1.08 / 1.06 / 1.04 / 1.02）倍である。よって，太陽の放射するエネルギーが一定だとすると，近日点で地球の受ける太陽放射のエネルギーは，遠日点で受けるエネルギーの約（1.08 / 1.06 / 1.04 / 1.02）倍である。つまり，上の図に示されている太陽定数の変動の振幅は，1 年間に地球の受ける太陽放射の変動の振幅よりも（大きい / 小さい）ことがわかる。

問題(2)　次の図は，黒点数の多い時期と少ない時期の太陽表面のようすを可視光線と紫外線で観測して得られた画像です。黒点数の変動について述べた下の文章中の（　　　）について，正しいものを選びましょう。

黒点の多い時期〔2014年4月14日〕
可視光線〔波長450nm〕紫外線〔波長170nm〕



黒点の少ない時期〔2019年4月12日〕
可視光線〔波長450nm〕紫外線〔波長170nm〕



(NASA)

太陽定数と黒点数の変動からは，太陽定数と黒点数がほぼ同じ周期で変動しており，両者が（比例する ／ 正の相関をもつ ／ 負の相関をもつ）ことが読み取れる。

黒点は光球面上で周囲より温度の（高い ／ 低い）領域であり，単位面積あたりの放射エネルギーが（大きい ／ 小さい）ため暗く見える。このことだけから考えると，黒点の多い時期には太陽定数が（大きく ／ 小さく）なるはずである。

黒点の多い時期と少ない時期の画像を比較すると，可視光線ではあまり違いがはっきりしない。しかし，紫外線で見ると黒点の多い時期の方が（白斑 ／ 粒状斑）が多く，光球面上で周囲より温度の（高い ／ 低い）領域が広くなっていることがわかる。このことの影響が黒点の広がりの影響よりも大きいため，黒点の多い時期には太陽定数が大きくなると考えられている。

また，紫外線は成層圏の大気の加熱や化学反応に関わる。そのため，太陽活動の変動に伴う紫外線量の変動は，成層圏の変動に対して大きな影響を与えている。

第 19 講　PART3　確認問題

問 1　次の文章の空欄ア，イに入る語句の組合せとして最も適当なものを，下の①～④のうちから一つ選べ。

太陽の（　ア　）の数は，太陽の磁気的な活動の強さを表しており，（　ア　）数が多いほど太陽活動は活発な時期にあたるといえる。太陽の（　ア　）の数は平均して約（　イ　）周期で増減している。

①　ア：白斑　　イ：11 か月
②　ア：白斑　　イ：11 年
③　ア：黒点　　イ：11 か月
④　ア：黒点　　イ：11 年

問 2　太陽活動による突発的な現象について，下の問いに答えよ。

(1)　おもに黒点付近の上空で見られる，太陽大気が爆発的に輝く現象を何というか。最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　デリンジャー現象　　②　コロナ質量放出
③　フレア　　④　磁気嵐

(2)　(1)の現象によって強い電磁波が放出されると，地球の電離圏に影響を与え，通信障害などが起こることを何というか。最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　デリンジャー現象　　②　コロナ質量放出
③　フレア　　④　磁気嵐

⑶　コロナ中のプラズマが，突発的に宇宙空間へと放出される現象を何というか。最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　デリンジャー現象　　②　コロナ質量放出
③　フレア　　④　磁気嵐

⑷　⑶の現象によって密度の大きな太陽風が地球に到達して引き起こされる地球磁気圏の突発的な変化を何というか。最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　デリンジャー現象　　②　コロナ質量放出
③　フレア　　④　磁気嵐

PART4 太陽系の惑星

目標　太陽系の惑星の分類と各惑星の特徴について，簡潔に説明できる。

Chapter1　太陽系の惑星

太陽系には，さまざまな特徴をもつ 8 つの惑星があります。ここでは，太陽系の惑星の特徴について学びましょう。

知っておこう
太陽系の惑星については地学基礎でも学んでいます。ここでは地学基礎で扱われない内容を中心に学びますので，必要に応じて地学基礎の同単元を復習してください。

太陽系の惑星

・**太陽系の惑星の大分類** 地学基礎

	地球型惑星	木星型惑星	
		巨大ガス惑星	巨大氷惑星
質量〔地球＝1〕	0.05 ～ 1	100 ～ 300	10 ～ 20
半径〔地球＝1〕	0.3 ～ 1	9 ～ 11	4
平均密度〔g/cm^3〕	3.9 ～ 5.5	0.7 ～ 1.3	1.3 ～ 1.6
大気	惑星による	H_2 , He	H_2 , He, CH_4
外層	岩石	金属水素 , He	氷
核	金属	?	岩石・氷

知っておこう
巨大ガス惑星の核については，今のところはっきりとしたことがわかっていません。岩石と氷を主体とする小さな核があるという説のほか，さまざまな元素が混ざり，半径の半分に達するような巨大な核が存在するという説も近年の探査機の調査結果から提唱されています。

・**水星**

核の半径が比較的大きいため，平均密度が大きい〔$5.4g/cm^3$〕。

大気はほとんどなく, 表面は多数のクレーターに覆われている。

・**金星**

固体部分の大きさ，内部構造，化学組成は地球とよく似ている。

赤道面が公転面と約 3° の角をなし，公転と逆向きに周期約 243 日でゆっくりと自転している。赤道上空の高度 60 ～ 70km ではスーパーローテーションと呼ばれる強風が吹いている。

知っておこう
スーパーローテーションは，自転速度を超える強風であることから名づけられました。風速は最大で 100m/s 程度であり，赤道における金星の自転速度の約 60 倍に達します。

・**地球**

地球型惑星のうち質量・半径・平均密度が最大であり，現在プレート運動が起こっている唯一の惑星である。

・**火星**

半径は地球の約半分で地表面気圧は0.01気圧以下だが，自転周期や季節性，表面温度などの表層環境は地球に最も近い。

極にはH_2OとCO_2の氷からなる極冠が形成され，季節により消長をくり返している。

・**木星**

太陽系最大の惑星で，平均密度や化学組成は太陽に近い。

木星表面から放射されるエネルギーの大きさは，入射する太陽放射の2倍近い。このエネルギーのうち太陽放射より大きな部分は，惑星形成時の熱が放出されているものだと考えられている。

・**土星**

太陽系で2番目に大きく，偏平率が太陽系最大〔約0.1〕，平均密度が太陽系最小〔$0.7g/cm^3$〕の惑星。

おもに直径10m未満の微細な氷からなる環〔リング〕をもつ。

・**天王星**

赤道面が公転面と82°の角をなし，公転とは逆向きかつ横倒しの状態で自転している。

・**海王星**

海王星表面から放射されるエネルギーの大きさは入射する太陽放射の2倍を超える。また，太陽系で最も強く秒速600m/sに達する風が吹く。いずれも原因はよくわかっていない。

知っておこう

太陽系の惑星のうち金星と火星には固有の磁場が存在しないとされています。

かつては水星にも磁場がないと考えられていましたが，探査機の観測によって地球の約1%程度の強さの磁場が存在することがわかりました。磁場の存在は，水星の核がまだ完全に冷え固まっておらず，対流を起こしていることを示しています。

知っておこう

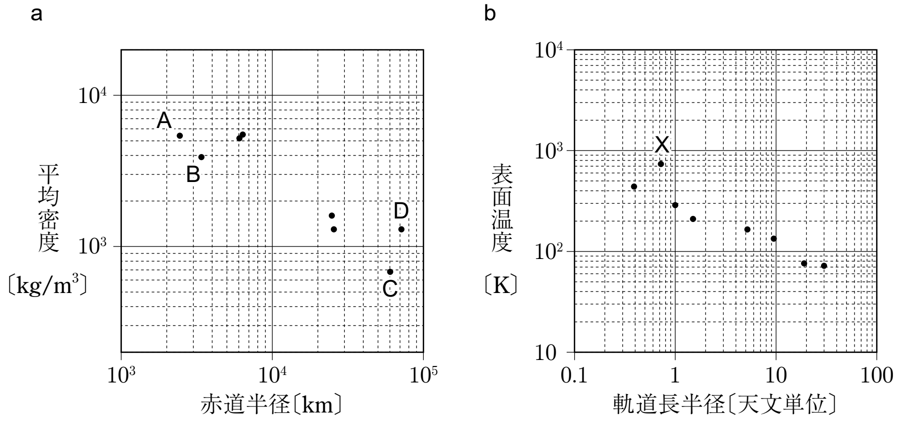
土星の環は中心から20万km以上も離れた場所まで広がりますが，厚さは10m程度に過ぎません。そのため，ふだんは土星にははっきりとした環があるように見えますが，地球が土星の赤道面上にあるときには環が消滅したように見えます。

まとめ

・太陽系の惑星は，おもに岩石質である＿＿＿＿＿＿と，その他の惑星である木星型惑星に分類される。
・木星型惑星には，巨大ガス惑星の＿＿＿，＿＿＿と，巨大氷惑星の＿＿＿＿，＿＿＿＿がある。

Chapter2　演習問題

次の図は，太陽系の惑星の性質を両対数グラフ上に示した散布図です。ここでは，これらの図を用いて太陽系の惑星の特徴についての理解を深めましょう。



問題(1)　図 a について述べた次の文章中の（　　　）について，正しいものを選びましょう。

この図をもとにすると，太陽系の惑星は図の左上に位置する４つの惑星と，右下に位置する４つの惑星の２つのグループに分けることができる。左上のグループは（内惑星 / 外惑星 / 地球型惑星 / 木星型惑星），右下のグループは（内惑星 / 外惑星 / 地球型惑星 / 木星型惑星）と呼ばれる。

問題(2)　図 a 中の A ～ D に対応する惑星の名称をそれぞれ答えましょう。

問題(3)　図 b について述べた次の文章中の（　　　）について，正しいものを選びましょう。

　この図からは，惑星の軌道長半径が 100 倍になると表面温度がおよそ（100 ／ 10 ／ 0.1 ／ 0.01）倍になるという大まかな関係が読み取れる。このような関係となる理由について考えてみよう。

　太陽定数を S，アルベドを A，シュテファン・ボルツマン定数を σ とすると，地球の放射平衡温度 T_{E} は

$$T_{\mathrm{E}} = \left\{ \frac{(1-A)S}{4\sigma} \right\}^{\frac{1}{4}}$$

と表せる。ここで太陽定数は，太陽から 1 天文単位の距離において，太陽放射に垂直な単位面積が単位時間に受ける太陽放射のエネルギーである。よって，軌道長半径が r の惑星の放射平衡温度を T_{r} は，上の式の S を（ Sr ／ Sr^2 ／ $\frac{S}{r}$ ／ $\frac{S}{r^2}$ ）で置き換えることで

$$T_{\mathrm{r}} = \left\{ \frac{(1-A)S}{4\sigma} \right\}^{\frac{1}{4}} \cdot r^{-\frac{1}{2}}$$

$$= \frac{T_{\mathrm{E}}}{\sqrt{r}}$$

と求めることができる。

　この式からは，A や S が一定のとき，軌道長半径が 100 倍になると放射平衡温度が（100 ／ 10 ／ 0.1 ／ 0.01）倍になることがわかる。これは，図 b から読み取れた関係と一致する。

知っておこう

放射平衡温度については，大気・海洋の分野で学んでいます。必要に応じて見直してみましょう。

問題(4)　図 b 中のすべての惑星の表面温度が**問題(3)**で考えた放射平衡温度の関係にしたがっているわけではありません。特に，図中の X に対応する惑星の表面温度は他の惑星より高く見えます。この惑星の名称と，その表面温度が高い理由を答えましょう。

第19講　PART4　確認問題

問1　太陽系の８つの惑星を，(ア)地球型惑星，(イ)巨大ガス惑星，(ウ)巨大氷惑星に分類したものとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ア：水星，金星，地球
　　イ：火星，木星，土星
　　ウ：天王星，海王星
②　ア：水星，金星，地球
　　イ：火星，木星，土星，天王星
　　ウ：海王星
③　ア：水星，金星，地球，火星
　　イ：木星，土星
　　ウ：天王星，海王星
④　ア：水星，金星，地球，火星
　　イ：木星，土星，天王星
　　ウ：海王星

問2　次の問いに答えよ。

(1)　太陽系最大の惑星は何か。最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　金星　　②　木星　　③　土星　　④　海王星

(2)　周期約 243 日でゆっくりと自転し，赤道上空ではスーパーローテーションという強風が吹く惑星は何か。最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　水星　　②　金星　　③　火星　　④　天王星

(3) 半径は地球の約半分で，自転周期や季節性，表面温度などが地球に最も近い惑星は何か。最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① 金星　② 火星　③ 天王星　④ 海王星

(4) 偏平率が太陽系最大で，平均密度が太陽系最小の惑星は何か。最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① 水星　② 火星　③ 土星　④ 天王星

PART5 太陽系のさまざまな天体

目標 太陽系の衛星やその他の小さな天体の特徴について，簡潔に説明できる。

Chapter1　太陽系の衛星

地球に月があるように，多くの惑星は衛星をもちます。ここでは，太陽系の衛星の特徴について学びましょう。

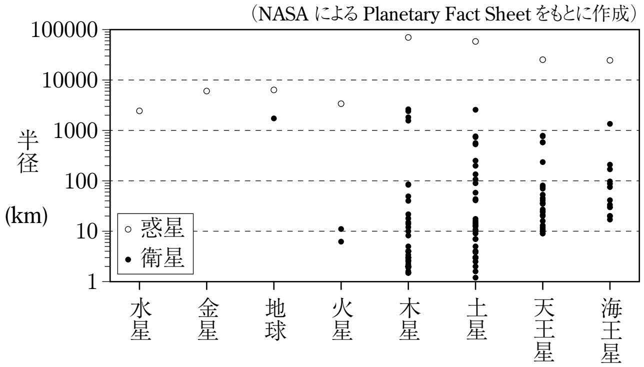
太陽系の衛星の概要

・衛星とは

太陽系の人工物でない天体のうち，太陽以外の天体のまわりを周回している天体を**衛星**という。

・太陽系の惑星と衛星

（NASA による Planetary Fact Sheet をもとに作成）



→水星と金星以外の惑星はすべて衛星をもち，特に（地球型惑星 / 木星型惑星）は衛星数が多い。

知ってておこう

左の図は，半径が 1km を超える衛星のみをまとめたものです。木星や土星には，さらに小さな衛星も多数存在します。

なお，形成時に自然と球形になるのは半径が 500km 程度より大きな天体に限られ，それより小さな天体には不規則な形状のものも多くあります。左の図の「半径」は，それぞれの天体と同じ体積をもつ球の半径を表しています。

各惑星の衛星の特徴

・地球の衛星

地球は衛星として**月**をもつ。月の形成過程としては，原始地球に別の原始惑星が衝突し，そのとき地球の周りに飛び散った物質が再び集まったとする**ジャイアント・インパクト説**が有力である。

月の白っぽい部分は斜長岩〔斜長石を主体とする岩石〕か

らなり標高の高い部分であり，**高地**と呼ばれる。黒っぽい部分は（玄武岩 / 花こう岩）がクレーターを埋めており，**海**と呼ばれる。

・**木星の衛星**

木星の衛星のうち特に大きな4つの衛星は半径が1000kmを超え，**ガリレオ衛星**と呼ばれる。ガリレオ衛星のうち，ガニメデ,カリスト,エウロパは固体表面の下に液体の水〔塩水〕からなる海をもつとされる。また，**イオ**では木星の（転向力 / 起潮力）により活発な火山活動が起こっている。

・**土星の衛星**

土星の衛星のうち半径が1000kmを超える大きな衛星は**タイタン**のみである。タイタンは約1.5気圧の厚い大気をもち，地球における水と同様にして（水素 / メタン）が状態変化をくり返して循環している。

また，6番目に大きな衛星であるエンセラダスは固体表面の下に液体の水〔塩水〕からなる海をもち，表面の割れ目から吹き出た成分が土星の環〔E環〕の供給源となっている。

・**天王星の衛星**

天王星は10個以上の衛星をもつが，最大のチタニアでも半径は1000kmに満たない。

・**海王星の衛星**

海王星の衛星のうち半径が1000kmを超える大きな衛星はトリトンのみであり，ここでは太陽放射を熱源とする火山活動が起こっている。

知っておこう

ガリレオ衛星は，1609年から1610年にかけて望遠鏡による観測でこれらの衛星の公転のようすを記録したガリレオ（Galileo Galilei）に因んだ名称です。

知っておこう

ガニメデは固有の磁場をもつ太陽系唯一の衛星であり，オーロラも観測されています。

まとめ

・太陽系の______型惑星は，すべて多数の衛星をもつ。
・木星の4つの大きな衛星は____________と呼ばれ，そのうち______では活発な火山活動が起こっている。
・土星最大の衛星は__________であり，そこでは大気中に含まれる_______が状態変化をくり返して循環している。

Chapter2　太陽系のさまざまな天体

恒星，惑星，衛星以外にも，太陽系には多くの天体が存在します。ここでは，そのような天体について学びましょう。

彗星

・彗星の構造

太陽系の内側でガスや塵を放出する天体を**彗星**という。

彗星の中心核は岩石，塵，氷などの集合体であり，その直径は数 km 程度である。

彗星が太陽に近づくと，中心核に含まれる揮発性物質が気体となって中心核を取り巻く**コマ**を形成する。また，コマを形成する揮発性成分の一部は太陽からの紫外線によって電離して，太陽風によって太陽とほぼ正反対の方向に流される。これを**イオンの尾**という。さらに，中心核に含まれる塵が軌道上に放出され，これが**塵の尾**となる。塵の尾も太陽放射によって流されるため，太陽と反対方向に伸びて見える。

・彗星の軌道

彗星には離心率の大きな楕円軌道を描いて公転するものが多い。軌道長半径が長く周期が 200 年以上に達するものは長周期彗星と呼ばれる。一部の彗星は放物線や双曲線の軌道をもつ。

・彗星の起源

長周期彗星のもととなる小天体は，太陽から数千～数万天文単位の距離の球殻上の領域に多数存在すると考えられている。この領域を**オールトの雲**というが，この領域の天体は未発見である。

知っておこう

彗星は太陽系の外縁部の小天体を起源とし，太陽系形成時の情報を保っているとされています。

太陽系外縁天体と小惑星

・太陽系外縁天体

海王星の軌道より外側を公転する天体を**太陽系外縁天体**という。冥王星やエリスなど，半径が 1000km を超える球状の天体もいくつか発見されている。

・**小惑星**

惑星や衛星以外の天体のうち，おもに木星の軌道より内側を公転する天体を**小惑星**という。小惑星のうち最大のセレスでも直径1000km程度であり，ほとんどは直径が100km未満である。

小惑星の多くは火星軌道と木星軌道の間の**小惑星帯**〔メインベルト〕に存在する。小惑星には，太陽系形成時の微惑星がそのまま残ったもののほか，原始惑星が衝突で壊れた破片など，さまざまな起源のものがあると考えられている。

流星と隕石

・**流星**

宇宙空間から地球へと小天体が高速で落下するとき，粒子から生じたプラズマや大気の原子・分子が発光する現象を**流星**という。流星は，おもに（成層圏 / 熱圏）の下部で生じる。

・**隕石**

宇宙空間から地球へと飛来した小天体が地表へと達したものを**隕石**という。

隕石はケイ酸塩の成分と鉄やニッケルの合金の成分を含み，ケイ酸塩を主体とするものを**石質隕石**，合金を主体とするものを**鉄隕石**，両者を同程度含むものを**石鉄隕石**という。

石質隕石のうちケイ酸塩の球状の粒であるコンドリュールを含むものは**コンドライト**と呼ばれ，太陽系形成時の未分化の物質だと考えられている。

知っておこう

流星のもととなる数十μmから1m程度の小天体を流星物質といいます。流星群の多くは，彗星の放出した流星物質の領域を地球が横切るときに観測されます。

知っておこう

英語では，
・流星物質…meteoroid
・流星………meteor
・隕石………meteorite
と呼ばれます。日本語では隕石だけ異なる表現ですが，英語では一連の語になっています。

知っておこう

微惑星が衝突するときの熱で溶融すると，重力によって密度の大きな金属質の成分と密度の小さなケイ酸塩の成分が分離します。この現象を分化と呼びます。

コンドライトのような未分化の物質は，一度も大規模な溶融を経験していないと考えられています。

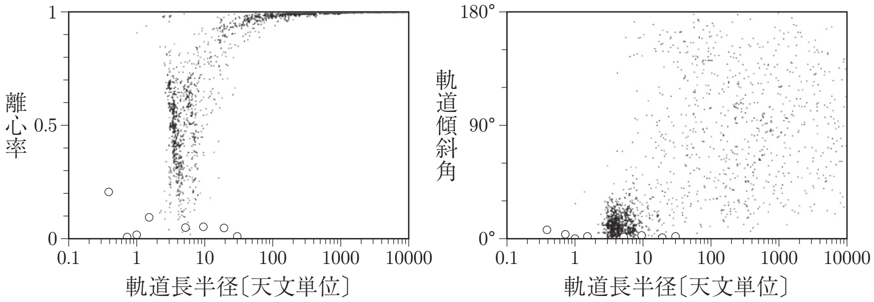
まとめ

・太陽系の内側でガスや塵を放出する天体を＿＿＿＿という。
・小惑星の多くは＿＿＿＿軌道と＿＿＿＿軌道の間に存在する。
・隕石のうち＿＿＿＿＿＿＿＿と呼ばれるものは，太陽系形成時の未分化の物質だと考えられている。

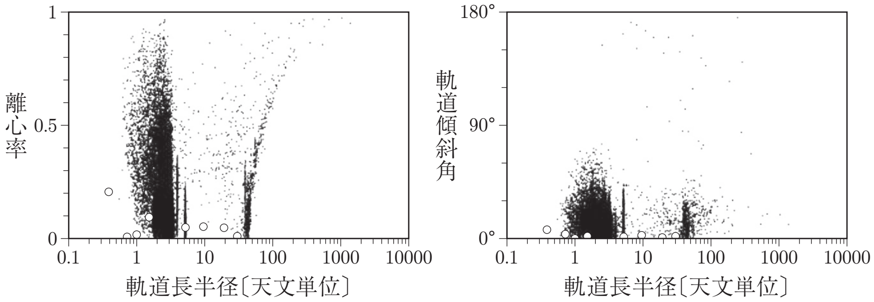
Chapter3　演習問題

次の図の a と b の黒い点は，それぞれ彗星と彗星以外の天体〔惑星と衛星は除く〕について，公転軌道の離心率と軌道傾斜角を示したものです。ここでは，太陽系のさまざまな天体の特徴について，具体的なデータを用いて理解を深めましょう。なお，図中の○は惑星のデータを表しています。また，90°より大きな軌道傾斜角は，公転の向きが地球の公転と逆向きであることを表しています。

a



b



(データは IAU Minor Planet Center および NASA による)

問題⑴　図 a に関連して述べた次の文章中の（　　　）について，正しいものを選びましょう。

この図からは，軌道長半径の小さな彗星より軌道長半径の大きな彗星の方が（細長い / 真円に近い）軌道を描いているものが多いことが読み取れる。また，軌道長半径の大きな彗星は軌道傾斜角のばらつきが大きく，彗星全体を見ると太陽を中心として（円盤状 / 球状）に分布していると考えることができる。

問題⑵　図 b について述べた次の文章中の（　　　）について，正しいものを選びましょう。

この図に示されている天体のうち，軌道長半径が約 30 天文単位以上のものは（オールトの雲 / 小惑星 / 太陽系外縁天体）と呼ばれる。同程度の軌道長半径の彗星と比べると，（細長い / 真円に近い）軌道を描いて地球の公転面と（同じような / ほぼ直交する）面上を公転しているものが多い。

また，この図に示されている天体のうち，軌道長半径が約 1 ～ 5 天文単位のものは（微惑星 / 小惑星 / 太陽系外縁天体）と呼ばれる。このグループの天体はさまざまな離心率をもつが，多くの天体は地球の公転面と（同じような / ほぼ直交する）面上を地球と（同じ / 逆の）向きに公転している。

問題⑶　冥王星について述べた次の文章中の（　　　）について，正しいものを選びましょう。

軌道長半径 39 天文単位，離心率 0.24，軌道傾斜角 17° の冥王星は，かつて惑星に分類されていた天体である。この天体が惑星に分類されなくなった理由について考えてみよう。

彗星以外の天体と惑星のデータを比較すると，惑星は軌道の離心率や軌道傾斜角が（大きく / 小さく），値のばらつきが（大きい / 小さい）ことが読み取れる。冥王星は，惑星とくらべて軌道傾斜角がやや大きい。

また，惑星とほぼ同じ軌道を公転する天体は，一部の例外を除いてほとんど存在しない。つまり，惑星は自分自身と同じ軌道に他の天体をもたない。この性質は冥王星については成り立たず，冥王星が惑星に分類されない根拠となっている。

第19講 PART5 確認問題

問１　次のア～ウは，どの惑星の衛星について説明したものか。最も適当な組合せを，下の①～④のうちから一つ選べ。

ア　最も大きな衛星はタイタンである。６番目に大きな衛星であるエンセラダスは固体表面の下に液体の水（塩水）からなる海をもつ。

イ　特に大きな４つの衛星はガリレオ衛星と呼ばれる。

ウ　最も大きな衛星はトリトンで，太陽放射を熱源とする火山活動が起こっている。

①　ア：土星　　イ：木星　　ウ：海王星
②　ア：土星　　イ：火星　　ウ：天王星
③　ア：木星　　イ：土星　　ウ：天王星
④　ア：木星　　イ：火星　　ウ：水星

問２　次の文章を読み，下の問いに答えよ。

太陽系の内側でガスや塵を放出する天体を彗星という。彗星には離心率の大きな（　エ　）軌道を描いて公転するものが多い。長周期彗星のもととなる小天体は，（　オ　）の雲と呼ばれる領域に多数存在すると考えられている。

木星の軌道より内側を公転する，惑星や衛星以外の天体を小惑星といい，多くは（　カ　）軌道と（　キ　）軌道の間の小惑星帯に存在する。

海王星の軌道より外側を公転する天体を太陽系外縁天体といい，（　ク　）やエリスなどが知られている。

(1) 空欄エ，オに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① エ：放物線　オ：オールト

② エ：放物線　オ：ガリレオ

③ エ：楕円　オ：オールト

④ エ：楕円　オ：ガリレオ

(2) 空欄カ，キに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① カ：水星　キ：金星　② カ：金星　キ：地球

③ カ：地球　キ：火星　④ カ：火星　キ：木星

(3) 空欄クに入る語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① イオ　② 冥王星　③ 北極星　④ セレス

問3 宇宙空間から地球へ飛来する小天体について，次の問いに答えよ。

(1) 小天体が高速で落下するときに，粒子から生じたプラズマや大気の原子・分子が発光する現象を何というか。最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① 彗星　② 衛星　③ 惑星　④ 流星

(2) 飛来した小天体が地表に達したもののうち，合金を主成分とするものを何というか。最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① 石質隕石　② 鉄隕石

③ 石鉄隕石　④ コンドライト

第 20 講　恒星
PART1 天体の等級

目標　天体の見かけの等級と絶対等級との関係について説明できる。

Chapter1　天体の等級

夜空の星にはさまざまな明るさのものがあります。ここでは，その明るさの表し方や，明るさと距離との関係について学びましょう。

見かけの等級

・見かけの等級の定め方

地球から天体を観測したとき，その明るさは恒星により非常に大きく異なる。そこで，天体の明るさを表すためには次のような**見かけの等級**を用いる。

・天体が暗いほど等級の値は大きい。

・天体の明るさが 100 倍異なると，等級は 5 等級異なる。

・見かけの等級の例

	太陽	シリウス	ベガ	北極星
見かけの等級	−26.7	−1.5	0.0	2.0

→明るさと等級との関係を数学的に定めたので，等級として小数や負の値も用いることができる。

絶対等級

・天体の光度と明るさとの関係

天体が単位時間に放射するエネルギーの総量を**光度**という。

天体が放射したエネルギーは天体を中心として球状に広がっていく。球の表面積は半径の（2 乗 / 3 乗）に（比例 / 反比例）するので，天体からの電磁波に垂直な単位面積の面が単位時間に受けるエネルギーである明るさは，天体までの距離の（2 乗 / 3 乗）に（比例 / 反比例）する。

知っておこう

「明るさ」というと漠然とした表現ですが，天文分野では測定可能な量として定義されています。

天体の明るさ（brightness）は，天体からの電磁波に垂直な単位面積の面が単位時間に受ける天体からの放射エネルギーです。大きさはまさに桁違いですが，太陽定数と同じ考え方ですね。

知っておこう

夜空で最も明るく見える星を 1 等星，肉眼で見える最も暗い星を 6 等星とする等級の概念は，古代ギリシャには既に存在したとされています。

現在用いられている明るさの比と等級の差の関係を定めたのはイギリスのポグソン（Norman Robert Pogson）で，1856 年のことです。

なお，等級の基準となる 0 等級の定義は，時代とともに少しずつ変化しています。現在の等級は，ベガを 0 等級とする考え方がもとになっています。

知っておこう

光度（luminosity）は，光源である天体自体がどれだけ光り輝いているかを表しています。

・**年周視差と天体の距離**

年周視差は天体までの（距離 / 距離の 2 乗）に（比例 / 反比例）するので，距離の指標となる。

そこで，天体までの距離の単位として，天体の年周視差が $1''$ となる距離を 1 **パーセク**と定める。このとき，年周視差が p〔$''$〕である天体の距離を d〔パーセク〕とすると，

$$d = \frac{1}{p}$$

が成り立つ。

・**絶対等級**

等級を用いて天体の光度を比較するためには，天体までの距離を同じにしておく必要がある。そこで，天体を（1 パーセク / 10 パーセク）の距離から見たと仮定したときの見かけの等級を考えて，これを**絶対等級**という。

・**距離指数**

絶対等級が M である天体の見かけの等級を m，地球から天体までの距離を d〔パーセク〕とすると

$$m - M = 5 \log_{10} \frac{d}{10}$$

が成り立つ。このように，$m - M$ の値は天体までの距離と対応付けられるため，距離指数と呼ばれることがある。

知っておこう

1 パーセクは，約 3.26 光年にあたります。恒星の年周視差は最大でも 0.77″であり，太陽以外のすべての恒星は地球から 1 パーセクより大きな距離にあります。

なお，10 パーセクまでにある恒星は約 400 個，100 パーセクまでにある恒星は約 30 万個です。

知っておこう

距離指数の式については，演習問題で詳しく扱います。
・見かけの等級 m は $d = 10$ のとき絶対等級 M と等しい。
・そこから距離が 10 倍になるごとに明るさが 100 分の 1 になり，見かけの等級 m が 5 だけ大きくなる。
ということを意識すると，式の意味がわかりやすいでしょう。

まとめ

・天体の等級は，明るさが＿＿＿＿倍になるごとに 5 等級大きくなるように定められている。
・年周視差が＿＿＿となる距離を 1 パーセクという。
・絶対等級は，天体を＿＿パーセクの距離から見たと仮定したときの見かけの等級である。
・絶対等級が同じ天体でも，距離が 10 倍になるごとに見かけの等級は＿＿＿だけ大きくなる。

Chapter2　演習問題

ここでは，天体の見かけの等級と絶対等級について，式の計算を行いながら確認しましょう。

問題(1)　天体の見かけの等級と明るさとの関係について述べた次の文章中の空欄［　**ア**　］～［　**ウ**　］に入る数値または式を答えましょう。

見かけの等級が 0 等級である天体の明るさを 1 とする。このとき，別の天体の見かけの等級を m 等級，明るさを l として，m と l との間にどのような関係が成り立つかを考えよう。

天体の等級が 5 等級大きくなるごとに明るさが［　**ア**　］倍になるということは，$\frac{m}{5}$ の値が 1 大きくなるごとに明るさが［　ア　］倍になるということである。つまり，$\frac{m}{5} = n$ とおくと，l は n を用いて

$$l = [\ \text{ア}\ ]^{[\ \text{イ}\ ]}$$

と表せる。したがって，l は m を用いて

$$l = [\ \text{ア}\ ]^{[\ \text{ウ}\ ]}$$

と表すことができる。

問題(2)　天体の距離と明るさとの関係について述べた次の文章中の空欄［　**エ**　］・［　**オ**　］に入る数値または式を答えましょう。

ある同じ天体を距離 d_1 の地点で観測したときの明るさを l_1，距離 d_2 の地点で観測したときの明るさを l_2 とする。明るさは距離の［　**エ**　］乗に反比例するので,

$$\frac{l_1}{l_2} = [\ \text{オ}\ ]$$

と表すことができる。

問題(3)　見かけの等級，絶対等級，距離の関係について述べた次の文章中の空欄［ **カ** ］～［ **コ** ］に入る数値または式を答えましょう。

絶対等級は，天体を［ **カ** ］パーセクの距離から見たと仮定したときの見かけの等級である。そこで，見かけの等級が m である天体 A について，絶対等級を M，地球から見た明るさを l，［ カ ］パーセクの距離から見た明るさを l_{10}，地球から天体 A までの距離を d〔パーセク〕として，m, M, d にどのような関係式が成り立つかを考えよう。

まず，**問題**(1)の結果により，m, M, l, l_{10} には

$$\frac{l}{l_{10}} = [\ \text{ア}\ ]^{[\ \text{キ}\ ]} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots ①$$

という関係が成り立つ。

また，**問題**(2)の結果により，d, l, l_{10} には

$$\frac{l}{l_{10}} = [\ \textbf{ク}\ ] \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots ②$$

という関係が成り立つ。

①式と②式より

$$[\ \text{ア}\ ]^{[\ \text{キ}\ ]} = [\ \text{ク}\ ]$$

となり，この両辺の常用対数を考えて計算することで

$$m - M = [\ \textbf{ケ}\ ]\ \log_{10}\frac{d}{10}$$

が得られる。この関係式は，$d = 10$ のとき $m = M$ であることや，同じ天体について d が 10 倍になるごとに m が［ ケ ］だけ大きくなることを表している。

なお，この関係式は

$$M = m + [\ \textbf{コ}\ ] - [\ \text{ケ}\ ]\log_{10} d$$

という形で，見かけの等級と天体までの距離から絶対等級を求める式として用いられることもある。

知っておこう

左の常用対数の計算はやや複雑なので，自力で変形するのが難しい人もいるかもしれません。

指数や対数が苦手な人は，ひとまず言葉として関係を理解しておき，計算についても少しずつ慣れれるようにするとよいでしょう。

第 20 講　PART1　確認問題

問 1　次の文章を読み，下の問いに答えよ。

天体の明るさを表す指標に見かけの等級と絶対等級がある。見かけの等級は地球から見た明るさを表し，天体が明るいほど等級の値は（　ア　），天体の明るさが 100 倍異なると，（　イ　）等級異なる。絶対等級は，その天体を a10 パーセクの距離から見たと仮定したときの見かけの等級のことである。

(1)　空欄ア，イに入る語句と数値の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ア：大きく　　イ：5
②　ア：大きく　　イ：6
③　ア：小さく　　イ：5
④　ア：小さく　　イ：6

(2)　太陽の見かけの等級として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　－ 27　　②　0　　③　6　　④　27

(3) 下線部 a について，天体までの距離を表す単位のパーセクの説明として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① 天体の年周視差が 1″となる距離を 1 パーセクとし，1 パーセクは約 3.26 天文単位である。

② 天体の年周視差が 1″となる距離を 1 パーセクとし，1 パーセクは約 3.26 光年である。

③ 天体の年周視差が 10″となる距離を 1 パーセクとし，1 パーセクは約 3.26 天文単位である。

④ 天体の年周視差が 10″となる距離を 1 パーセクとし，1 パーセクは約 3.26 光年である。

(4) 天体の絶対等級を M，見かけの等級を m，地球から天体までの距離を d〔パーセク〕とする。M と m の関係を表す式として適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① $m - M = 5\log_{10}\dfrac{d}{10}$

② $m - M = -5\log_{10}\dfrac{d}{10}$

③ $m - M = 5\log_{10}\dfrac{d}{100}$

④ $m - M = -5\log\dfrac{d}{100}$

PART2 恒星のスペクトル型

目標 恒星のスペクトル型と表面温度との関係について説明できる。

Chapter1　恒星のスペクトル型

　太陽放射と同様に，恒星の光もさまざまな波長の電磁波の集まりです。ここでは，その特徴や分類について学びましょう。

復習

スペクトル：
電磁波を波長ごとに分けたもの。虹のような光の帯として観察され，波長と放射エネルギーの強さの関係を表すグラフもスペクトルと呼ばれることがある。

太陽のスペクトル

・連続スペクトルと線スペクトル

電磁波のスペクトルには，次のようなものがある。

・**連続スペクトル**…波長に対して強度が連続的に変化するもの。

・**線スペクトル**……特定の波長のみに見られるもの。

輝線……特定の波長の電磁波のみ放射されて明るく見えるもの。

暗線……特定の波長の電磁波のみ吸収されて弱くなっているもの。

・フラウンホーファー線

　太陽のスペクトルに見られる暗線を**フラウンホーファー線**という。フラウンホーファー線は，太陽の放射した電磁波のうち特定の波長の電磁波を太陽大気が（強める ／ 吸収する）ため生じる。

知っておこう

太陽のスペクトルに暗線が存在することを示した最初の論文は，1802年にイギリスのウォラストン (William Hyde Wollaston) によるものです。彼の記録した暗線は7本でしたが，1814年頃にはドイツのフラウンホーファー (Joseph von Fraunhofer) が500本を超える暗線を記録しました。

恒星のスペクトル

・暗線の波長と強さ

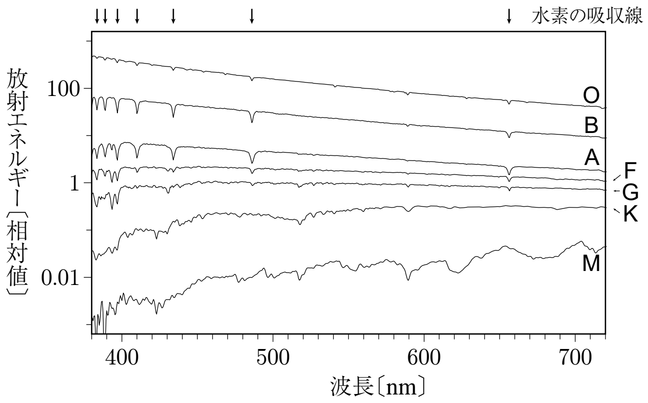
　暗線の波長は，恒星の大気中に含まれる元素によって決まる。

　また，元素によって吸収を起こしやすい温度が異なるため，強く現れる暗線の組合せは恒星の表面温度によって決まる。

・恒星のスペクトル型

暗線の組合せをもとにして恒星のスペクトルを分類したものを**スペクトル型**という。

スペクトル型はアルファベットにより大きく分類される。スペクトル型 O，B，A，F，G，K，M の順に暗線は多くなり，対応する表面温度は約 40000K から約 3000K へと低下していく。O 型の恒星は（青っぽく / 赤っぽく），M 型の恒星は（青っぽい / 赤っぽい）。



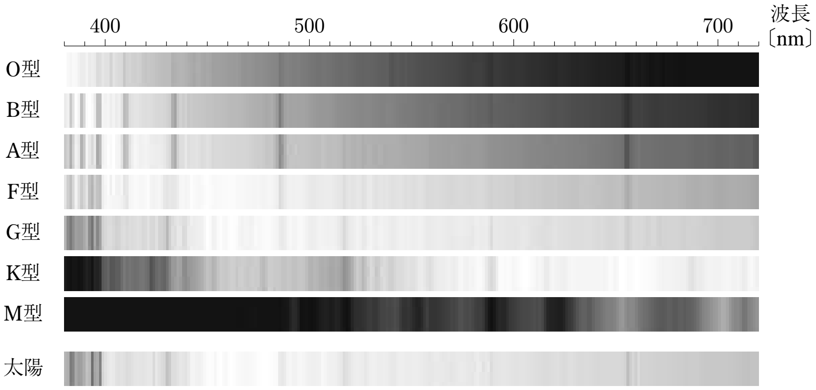
まとめ

・太陽のスペクトルに見られる暗線を＿＿＿＿＿＿＿＿線といい，特定の波長の電磁波を太陽の大気が＿＿＿＿することで生じる。

・暗線の組合せをもとにして恒星のスペクトルを分類したものを＿＿＿＿＿＿＿＿といい，そのうち最も高い表面温度に対応して青っぽいものは＿＿型，最も低い表面温度に対応して赤っぽいものは＿＿型である。

Chapter2　演習問題

次の図は，各スペクトル型の恒星と太陽のスペクトルを示したものです。ここでは，この図を用いてスペクトル型について確認しましょう。



問題(1)　恒星のスペクトルについて述べた次の文章中の（　　　）について，正しいものを選びましょう。

恒星のスペクトルのうちエネルギーが最も大きくなる波長は表面の（絶対温度 / 絶対温度の４乗）に（比例 / 反比例）し，これを（シュテファン・ボルツマンの法則 / ウィーンの変位則）という。各スペクトル型の図で最も明るい部分の波長に着目すると，O 型の恒星は表面温度が最も（高く / 低く），M 型の恒星は表面温度が最も（高い / 低い）と考えられる。

スペクトル中に見られる暗線は，恒星の（中心核 / 大気）に含まれる原子などが電磁波を吸収することで生じる。たとえば，波長 656nm には（Hα線 / γ線）と呼ばれる暗線がある。この暗線は，（水素原子 / ヘリウム原子）が電磁波を吸収し，電子がエネルギーの低い状態から高い状態へと変化することで生じる。波長 486nm，434nm，410nm の暗線も同じ原子の吸収により生じるものであり，表面温度が比較的（高い / 低い）恒星のスペクトルにおいてはっきりと確認できる。

問題⑵　太陽のスペクトルに見られる暗線を何というか，その名称を答えましょう。

問題⑶　太陽のスペクトルを他のスペクトルと比較し，太陽のスペクトル型を推定して答えましょう。

第 20 講　PART2　確認問題

問１　次の文章を読み，下の問いに答えよ。

電磁波のスペクトルには，波長に対して強度が連続的に変化する（　ア　）スペクトル，特定の波長のみに見られる（　イ　）スペクトルがある。（　イ　）スペクトルはさらに輝線と暗線に分けられる。また，a太陽のスペクトルに見られる暗線を（　ウ　）という。（　ウ　）は，太陽の放射した電磁波のうち特定の波長の電磁波を太陽大気が吸収するため生じる。

(1)　空欄ア～ウに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ア：連続　　イ：フラウンホーファー線　　ウ：線
②　ア：連続　　イ：線　　ウ：フラウンホーファー線
③　ア：フラウンホーファー線　　イ：線　　ウ：連続
④　ア：線　　イ：連続　　ウ：フラウンホーファー線

(2)　下線部ａについて，恒星のスペクトルの暗線の組合せは何によって決まるか。最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　恒星の質量　　②　恒星までの距離
③　恒星の直径　　④　恒星の表面温度

問２　次の問いに答えよ。

(1)　恒星のスペクトル型は何をもとにしてスペクトルを分類したものか。最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　暗線の組合せ　　②　輝線の組合せ
③　絶対等級　　④　見かけの等級

⑵　スペクトル型が M 型の恒星の説明として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　表面温度が低く赤っぽい。

②　表面温度が低く青っぽい。

③　表面温度が高く赤っぽい。

④　表面温度が高く青っぽい。

PART3 HR 図

目標 HR 図とはどのような図で，その図をもとに恒星をどのように分類できるのかを説明できる。

Chapter1　HR図

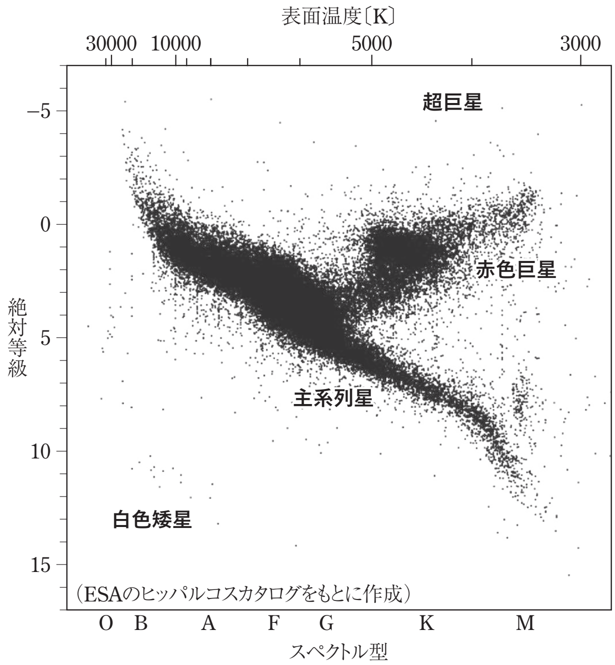
　ここまでに，恒星の光度を表す絶対等級や，表面温度に対応するスペクトル型について学びました。ここでは，恒星の絶対等級とスペクトル型にはどのような関係があるかを学びましょう。

HR図と恒星の分類

・HR 図とは

　横軸に（スペクトル型 / 絶対等級），縦軸に（絶対等級 / 見かけの等級）をとり，多くの恒星のデータを示した散布図を **HR 図**という。

　HR 図の軸は，左から右に向かって表面温度が（高く / 低く），下から上に向かって光度が（大きく / 小さく）なるようにとる。



知っておこう

HR 図に相当する図は，1911 年にデンマークのヘルツシュプルング (Ejnar Hertzsprung)，1913 年にアメリカのラッセル (Henry Norris Russell) によって独立に作成されました。HR 図という名称は，彼らの名前に由来しています。

知っておこう

本来の HR 図の軸は，左の本文に書かれているように定められています。しかし，暗い恒星のスペクトル型を調べることが難しいなどの理由により，近年の HR 図の多くは横軸に色指数と呼ばれる数値をとって描かれます。左の図はその一例であり，（図中には示していない）色指数を等間隔に取った結果として，スペクトル型が不規則な間隔で並んでいます。

　なお，HR 図の縦軸についても，絶対等級の代わりに光度が用いられることがあります。

・**恒星の分類**

主系列星……HR 図の（左上から右下 / 右上から左下）にかけての帯状の領域に分布する恒星。高温で（赤っぽい / 青っぽい）恒星とくらべて低温で（赤っぽい / 青っぽい）恒星の方が光度は（大きい / 小さい）。

赤色巨星……HR 図の（右上 / 左下）に分布し,（高温 / 低温）で光度の（大きい / 小さい）恒星。

超巨星………HR 図の最上部に分布し，非常に光度の（大きい / 小さい）恒星。

白色矮星……HR 図の（右上 / 左下）に分布し,（高温 / 低温）で光度の（大きい / 小さい）恒星。

まとめ

- 横軸にスペクトル型，縦軸に絶対等級をとり，多くの恒星のデータを示した散布図を________という。
- 多くの恒星はこの図の左上から右下にかけての帯状の領域に分布し，このような恒星を________という。
- この帯状の領域の恒星の光度は，青っぽいものより赤っぽいものの方が________。
- この図の右上に分布する恒星を________といい，左下に分布する恒星を________という。

Chapter2　演習問題

HR 図を用いると，恒星の性質を視覚的にわかりやすく整理できます。ここでは，HR 図を用いて恒星の大きさについて考えてみましょう。

問題(1)　恒星の光度について述べた次の文章中の空欄［　**ア**　］～［　**カ**　］に入る式または数値を答えましょう。ただし，シュテファン・ボルツマン定数を σ とします。

シュテファン・ボルツマンの法則により，表面温度が T の恒星の単位表面積から放射されるエネルギーは［　**ア**　］と表せる。半径 R の恒星の表面積は［　**イ**　］なので，その恒星の光度，すなわち恒星が単位時間に放射するエネルギーの総量を L とすると

$$L = [\quad \textbf{ウ} \quad] \qquad \cdots\cdots\cdots ①$$

である。

同様に，太陽の光度を L_S，表面温度を T_S，半径を R_S とすると

$$L_S = [\quad \textbf{エ} \quad] \qquad \cdots\cdots\cdots ②$$

であるから，①÷②を考えて

$$\frac{L}{L_S} = \left(\frac{T}{T_S}\right)^{[\ \textbf{オ}\ ]} \left(\frac{R}{R_S}\right)^{[\ \textbf{カ}\ ]} \qquad \cdots\cdots\cdots ③$$

が成り立つことがわかる。

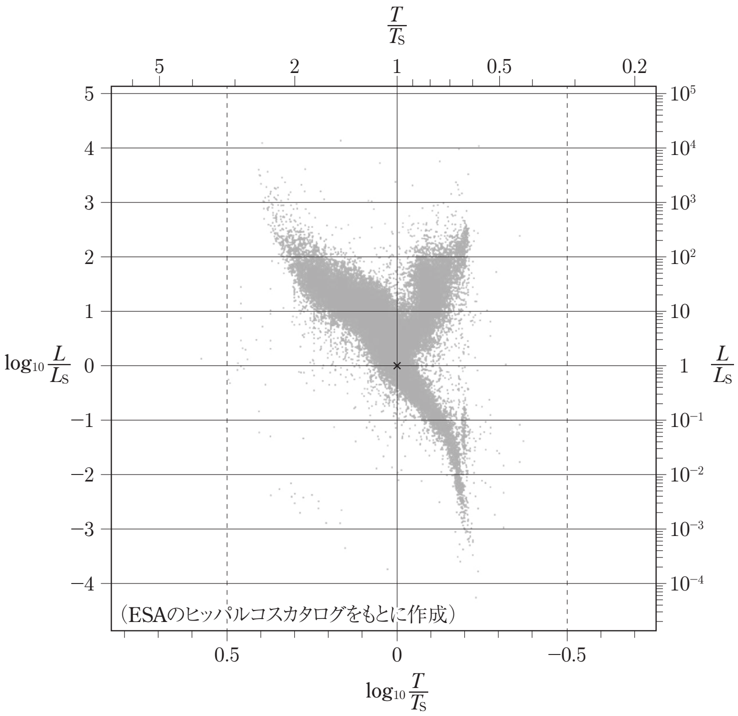
③式の両辺の常用対数を考えて，

$$\log_{10}\frac{L}{L_S} = [\quad オ \quad]\ \log_{10}\frac{T}{T_S} + [\quad カ \quad]\ \log_{10}\frac{R}{R_S}$$

$$\cdots\cdots\cdots ④$$

が得られる。

問題⑵　次の図は，横軸に $\log_{10}\dfrac{T}{T_S}$，縦軸に $\log_{10}\dfrac{L}{L_S}$ をとったHR図です。**問題**⑴の④式により，$R = 0.01R_S$, $0.1R_S$, R_S, $10R_S$, $100R_S$ の恒星の満たす関係をこの図中にそれぞれ実線で描きましょう。なお，参考のために図の上の横軸には $\dfrac{T}{T_S}$，右の縦軸には $\dfrac{L}{L_S}$ の値を示してあります。また，×は太陽のデータを表しています。



問題⑶　恒星の大きさについて述べた次の文章中の（　　　）について，正しいものを選びましょう。

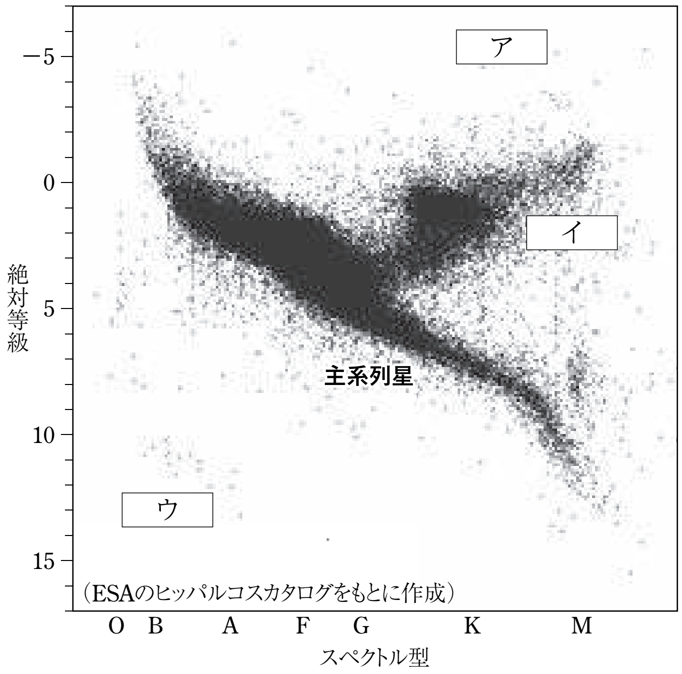
問題⑵の結果によると，表面温度の高い主系列星ほど半径は（大きい / 小さい）傾向がある。

また，表面温度が太陽の0.6倍程度の恒星には，半径が太陽の約0.1倍のものと約10倍を超えるものがある。小さい方は（O型 / M型）の主系列星であり，大きい方は赤色巨星と呼ばれる。

さらに，図中の白色矮星の半径は太陽の（0.01倍 / 100倍）程度であり，地球よりやや（大きい / 小さい）ことがわかる。

第 20 講　PART3　確認問題

問 1　図は，多数の恒星のスペクトル型と絶対等級の関係を示したものである。下の問いに答えよ。



(1)　このような図を何というか。最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　AB 図　　②　HR 図　　③　LS 図　　④　XY 図

(2)　図のア～ウに入る天体名の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ア：白色矮星　イ：赤色巨星　ウ：超巨星
②　ア：白色矮星　イ：超巨星　ウ：赤色巨星
③　ア：超巨星　イ：白色矮星　ウ：赤色巨星
④　ア：超巨星　イ：赤色巨星　ウ：白色矮星

(3) 図の主系列星についての記述として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① 左上にある恒星ほど，低温で暗い。

② 左上にある恒星ほど，低温で明るい。

③ 左上にある恒星ほど，高温で暗い。

④ 左上にある恒星ほど，高温で明るい。

PART4 主系列星の質量と寿命

目標　主系列星の質量と光度の関係および質量と寿命の関係について説明できる。

Chapter1　主系列星の質量と寿命

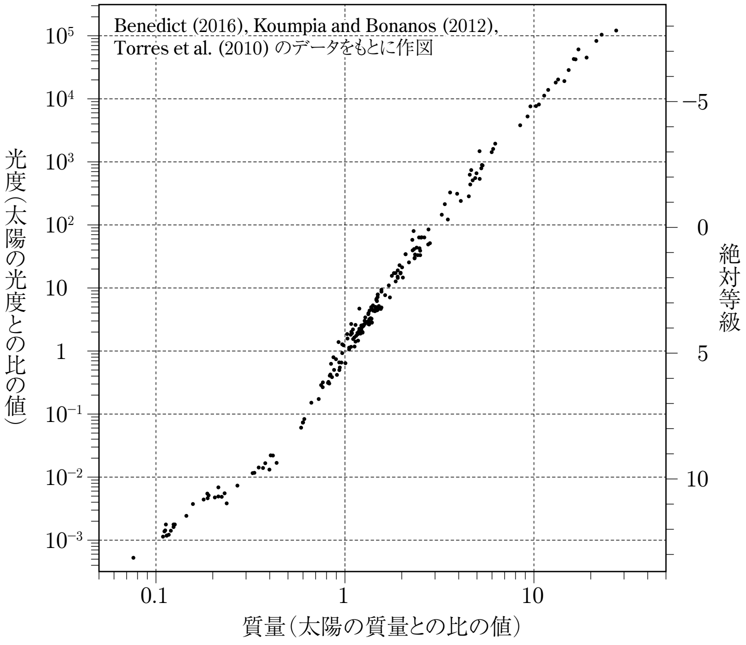
恒星にはさまざまな大きさのものがあり，質量もさまざまです。ここでは，主系列星の質量と光度の間にある関係や，質量と寿命との関係について学びましょう。

主系列星の質量光度関係と寿命

・質量光度関係とは

主系列星には質量と光度との間に一定の関係があることが知られており，これを**質量光度関係**という。

・質量光度関係のグラフ



→太陽の 0.5 倍～ 30 倍の質量をもつ恒星は，光度が質量の 3 ～ 5 乗に比例する。

知っておこう

質量光度関係のグラフは両対数グラフなので，少し読み取るのが難しいかもしれません。両対数グラフを読み取るときは，横軸の値が 10 倍になったときに縦軸の値が何倍になるか，に着目すると意味を考えやすいでしょう。

・質量光度関係と寿命

主系列星は，太陽のように水素の核融合で生じたエネルギーによって輝いている恒星である。そのため，主系列星について

・質量は核融合に使用できる水素の量に比例

・光度は核融合により単位時間に消費する水素の量に比例

と考えることができる。

よって，恒星の主系列星としての寿命，すなわち核融合に使用できる水素がなくなるまでの時間は，質量に（比例 / 反比例）し, 光度に（比例 / 反比例）する。質量光度関係を「光度が質量の 4 乗に比例する」と近似すると，恒星の寿命は質量の（3 乗 / 5 乗）に（比例 / 反比例）するといえる。すなわち，恒星の寿命は質量の大きいものほど（長い / 短い)。

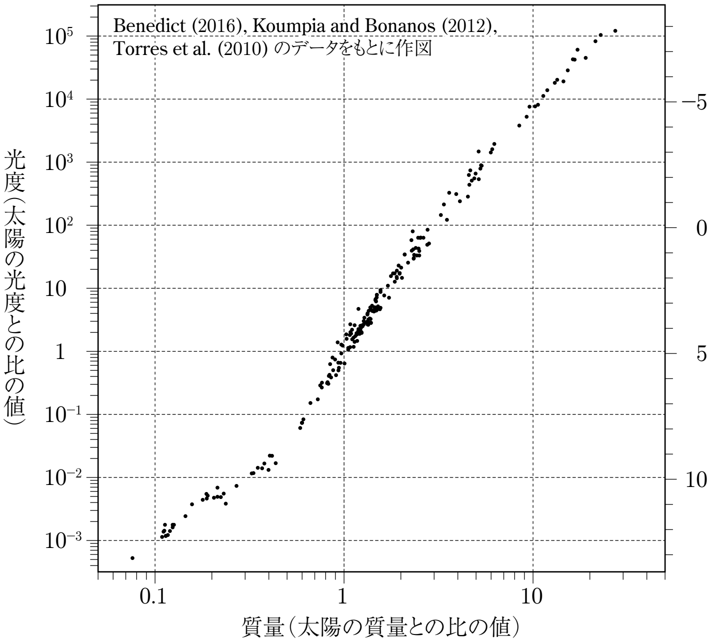
まとめ

・主系列星の質量と光度との間には＿＿＿＿＿＿＿＿と呼ばれる関係があり，光度は質量が大きいほど＿＿＿＿＿。

・恒星の主系列星としての寿命は恒星の質量に＿＿＿＿＿して光度に＿＿＿＿＿するため，恒星の主系列星としての寿命は，質量の大きいものほど＿＿＿＿。

Chapter2　演習問題

次の図は，主系列星の質量光度関係を表しています。ここでは，主系列星の質量と寿命との関係について確認しましょう。



問題⑴　恒星の質量，光度，寿命の関係について述べた次の文章中の（　　　）について，正しいものを選びましょう。また，空欄［　**ア**　］～［　**カ**　］に入る式を答えましょう。

太陽の質量を M_S，光度を L_S，寿命を t_S とする。また，恒星 A の質量を M，光度を L，寿命を t とする。

恒星の寿命は質量に（比例 / 反比例）し，光度に（比例 / 反比例）するので，比例定数 k を用いて

$$t = k\,\frac{[\ \textbf{ア}\ ]}{[\ \textbf{イ}\ ]} \qquad \cdots\cdots\text{①}$$

$$t_S = k\,\frac{[\ \textbf{ウ}\ ]}{[\ \textbf{エ}\ ]} \qquad \cdots\cdots\text{②}$$

と表せる。①式と②式より，$\frac{M}{M_S}$，$\frac{L}{L_S}$，$\frac{t}{t_S}$ の間には

$$\frac{t}{t_S} = \frac{[\ \textbf{オ}\ ]}{[\ \textbf{カ}\ ]} \qquad \cdots\cdots\text{③}$$

の関係があることがわかる。

問題⑵ 恒星の主系列星としての寿命について述べた次の文章中の空欄［ **キ** ］に入る数値を答えましょう。

太陽程度の質量の恒星には

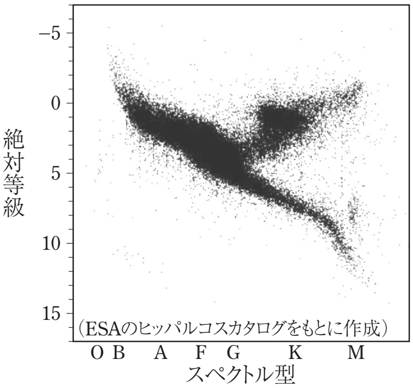
$$\frac{L}{L_S} = \left(\frac{M}{M_S}\right)^5 \quad \cdots\cdots\cdots ④$$

の関係がある。このとき，③式と④式をもとにすると，

$$\frac{t}{t_S} = \frac{1}{\left(\frac{M}{M_S}\right)^{[\ キ\ ]}} \quad \cdots\cdots\cdots ⑤$$

が成り立つことがわかる。つまり，主系列星としての寿命は質量の［ キ ］乗に反比例する。

問題⑶ 次の HR 図を参考にして，下の文章中の（　　　）について，正しいものを選びましょう。



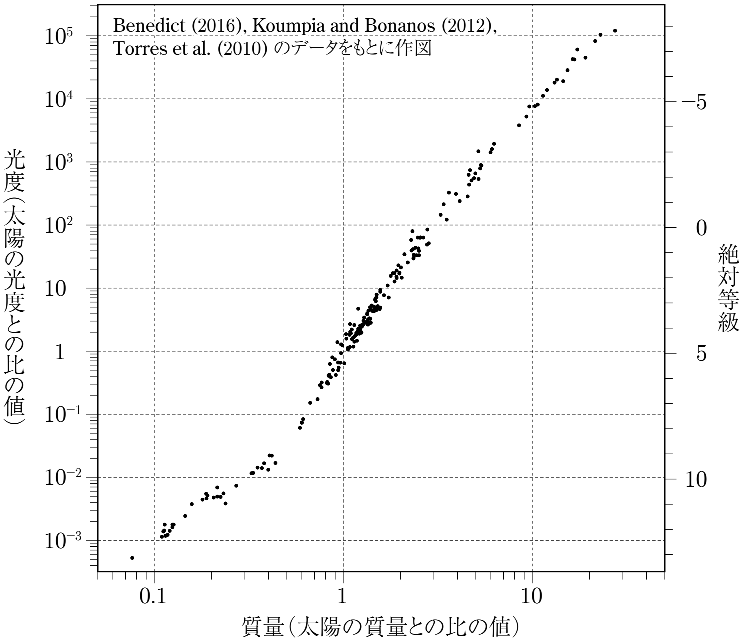
太陽の主系列星としての寿命は約（50 ／ 100）億年である。ここでは⑤式ではなく，質量光度関係のグラフを用いて，他の恒星の主系列星としての寿命を推定してみよう。

スペクトル型がＢ型で絶対等級が－５等級の主系列星は，光度が太陽の約（100 ／ 10000）倍，質量が太陽の約（10 ／ 30）倍である。よって，この恒星の寿命は約（1000 万 ／ 1 億）年である。

一方，スペクトル型が M 型で絶対等級が（0 ／ 10）等級の主系列星についても質量と光度をグラフから読み取って計算すると，この恒星の寿命は約（3000 万 ／ 3000 億）年だと推定できる。

第 20 講 PART4 確認問題

問１ 図は，主系列星の質量光度関係を示したものである。下の問いに答えよ。



(1) 図から，太陽の 10 倍の質量をもつ主系列星の光度は，太陽の光度の約何倍か。最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① 10 倍　　② 100 倍
③ 1000 倍　　④ 10000 倍

(2) 恒星の主系列星としての寿命と質量との関係として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① 恒星の寿命は，質量が大きいほど長い。
② 恒星の寿命は，質量が大きいほど短い。
③ 恒星の寿命は，ある質量で最も長くなる。
④ 恒星の寿命は，質量によらず一定である。

< Note >

PART5 太陽質量の恒星の一生

目標　太陽程度の質量をもつ恒星の一生について，各段階の名称を挙げて説明できる。

Chapter1　太陽質量の恒星の一生

恒星の一生は，その質量によって大きく異なります。ここでは，太陽と同程度の質量をもつ恒星の一生について学びましょう。

恒星の形成

・**星間物質と星間雲の形成**

おもに水素とヘリウムからなる**星間ガス**と，炭素，氷，ケイ酸塩などの固体微粒子である**星間塵**をあわせて**星間物質**という。

星間物質は，通常 1 個 /cm^3 未満の低密度である。星間物質が周囲より密〔数個 /cm^3 ～ 10^2 個 /cm^3 程度〕な領域を**星間雲**という。

・**分子雲と原始星の形成**

水素がおもに分子の状態で存在している星間雲を**分子雲**という。

分子雲の中心部では分子が自分自身の重力により集まり，密度が 10^2 個 /cm^3 程度から 10^5 個 /cm^3 程度へと上昇する。これにより，重力エネルギーによって輝く天体である**原始星**が形成される。

原始星が形成された時点では周囲の分子雲の密度が大きく，原始星の放射する可視光線を地球から観測することはできない。原始星は，おもに（紫外線 / 赤外線）で観測される。

・**T タウリ型星と原始惑星系円盤**

原始星が形成されて，その周囲の星間物質が減少すると，中心の恒星を可視光線で観測できるようになる。この段階の恒星を**T タウリ型星**という。

また，星間物質が T タウリ型星のまわりを公転することで形成される円盤を**原始惑星系円盤**という。

知っておこう

天文分野では，一部の用語の意味が他の分野と異なっています。特に，高校地学で用いられる用語としては以下のものに注意しましょう。

重力…万有引力のこと。
密度…単位体積あたりの質量のほか，単位体積あたりの個数も表す。

知っておこう

星間雲には，星間ガスが周囲の恒星の光を受けて自ら発光したり，星間塵が光を反射したりすることで明るく見えるものがあります。これらを**散光星雲**といいます。

また，背後にある明るい天体の光を星間塵が吸収することで暗く見えるものもあり，これは**暗黒星雲**と呼ばれます。

知っておこう

分子雲には，水素分子のほかに一酸化炭素（CO）や水（H_2O），アンモニア（NH_3），エタノール（C_2H_5OH）など，さまざまな分子が存在することがわかっています。

・**主系列星の形成**

Tタウリ型星への星間物質の集積や重力による収縮が進むと，やがて中心部の温度が（6000K ／ 1000 万 K）を超えて水素の核融合が起こるようになる。この状態の恒星を**主系列星**という。

主系列星は，重力により収縮しようとする力と，核融合の熱により膨張しようとする力がつり合った安定な恒星である。

恒星の終末

・**赤色巨星**

主系列星の中心核で核融合が進むと，中心核の主成分がヘリウムとなる。中心核では核融合が行われなくなり，その外側の殻状の領域で水素の核融合が起こるようになる。このとき恒星は大きく膨張し，表面温度は（上昇 ／ 低下）する。この状態の恒星を**赤色巨星**という。

赤色巨星の中心核の温度が約 1 億 K を超えるとヘリウムの核融合が始まり，（炭素や酸素 ／ マグネシウムや鉄）が生成される。

・**惑星状星雲と白色矮星**

赤色巨星は活発な質量放出を起こし，やがて外層を失う。このとき，放出された外層部が恒星からの電磁波を受けて輝いて見えるものを**惑星状星雲**という。

外層を失った中心核は，核融合を起こさず冷えていく。この段階の恒星を**白色矮星**という。

まとめ

・原始星周辺の星間物質が減少し，可視光線で観測されるようになったものを＿＿＿＿＿＿という。
・太陽は現在＿＿＿＿＿の段階にあり，やがて＿＿＿＿＿の中心核が形成されると赤色巨星になる。
・赤色巨星の外層が放出され，電磁波を受けて輝いているものを＿＿＿＿＿，残された中心核を＿＿＿＿＿という。

Chapter2　演習問題

ここでは，太陽質量の恒星が原始星や主系列星である期間の長さを見積もってみましょう。

問題(1)　原始星について述べた次の文章中の空欄［　**ア**　］～［　**カ**　］に入る数値を整数で答えましょう。

原始星は，重力のエネルギーにより輝いている。太陽程度の質量をもつ原始星が輝き続ける時間を大まかに見積もってみよう。

原始星の質量をM，原始星の半径をR，万有引力定数をGとすると，原始星のもつ重力のエネルギーEは

$$E = \frac{GM^2}{R} \qquad \cdots\cdots\cdots ①$$

と見積もることができる。

また，原始星の光度Lは，表面温度をT，シュテファン・ボルツマン定数をσとすると

$$L = \sigma T^{[\ ア\ ]} \cdot 4\pi R^{[\ イ\ ]} \qquad \cdots\cdots\cdots ②$$

と表せる。

このとき，①式と②式より，原始星が重力のエネルギーをすべて電磁波として放射するためにかかる時間tの目安は

$$t = \frac{E}{L}$$
$$= \frac{GM^{[\ ウ\ ]}}{4\pi\sigma T^{[\ エ\ ]} R^{[\ オ\ ]}}$$

である。$G = 7 \times 10^{-11} \mathrm{m^3/(kg \cdot s^2)}$，$\pi = 3$，$\sigma = 6 \times 10^{-8}\ \mathrm{W/(m^2 \cdot K^4)}$，$M = 2 \times 10^{30}\mathrm{kg}$，$T = 6 \times 10^3\mathrm{K}$，$R = 7 \times 10^8\mathrm{m}$，1年$= 3 \times 10^7$秒とすると，

$$t \fallingdotseq 9 \times 10^{14}\mathrm{s}$$
$$\fallingdotseq 3 \times 10^{[\ カ\ ]} 年$$

と求められる。

知っておこう

太陽が原始星〔原始太陽〕であった期間は，およそ3000万年だとされています。

問題⑵　主系列星について述べた次の文章中の空欄［ **キ** ］・［ **ク** ］に入る数値を整数で答えましょう。

主系列星は，水素の核融合によってエネルギーを生み出している恒星である。太陽が主系列星でいる間にどの程度の水素を消費するのかを考えてみよう。

水素の核融合では，水素原子核の質量の和よりもヘリウム原子核の質量の方が0.7%だけ小さい。この質量の差をΔm，光速度をc，核融合によって生じるエネルギーをEとすると，

$$E = \Delta mc^2$$

と表せる。

ここで，仮に質量Mの太陽の全体が水素でできているとして，そのすべてが核融合によって消費されるとする。このとき，太陽の質量の0.7%が核融合によってエネルギーに変換されると考えて，核融合によって生じるエネルギーは

$$E = (7 \times 10^{[\text{キ}]})Mc^2 \quad \cdots\cdots\cdots ③$$

と表せる。

②式と③式より，太陽がすべての水素を核融合に消費する時間をtとおくと

$$t = \frac{E}{L} = \frac{(7 \times 10^{[\text{キ}]})Mc^2}{4\pi\sigma T^{[\text{ア}]}R^{[\text{イ}]}}$$

である。$M = 2 \times 10^{30}$ kg，$c = 3 \times 10^8$m/s，$\pi = 3$，$\sigma = 6 \times 10^{-8}$W/(m^2・K^4)，$T = 6 \times 10^3$K，$R = 7 \times 10^8$m，1年 = 3×10^7秒 とすると，

$$t \fallingdotseq 2 \times 10^{18}\text{s} \fallingdotseq 7 \times 10^{[\text{ク}]}\text{年}$$

と求められる。

知っておこう

太陽が主系列星である期間は，およそ100億年だとされています。

太陽が形成されたのは約46億年前なので，太陽の主系列星としての期間のうち，現在はほぼ中間地点にあたることになりますね。

第 20 講　PART5　確認問題

問 1　恒星の形成について，次の問いに答えよ。

(1)　星間ガスの主成分は何か。最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　水素とヘリウム　　②　水素と酸素
③　ヘリウムと炭素　　④　酸素と炭素

(2)　星間物質が周囲より密になった領域を何というか。最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　星間塵　　②　原始星　　③　星間雲　　④　彗星

(3)　原始星の周囲の星間物質が減少して，中心の恒星を可視光線で観測できるようになった段階の恒星を何というか。最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　散光星雲　　②　暗黒星雲
③　主系列星　　④　T タウリ型星

(4)　中心部の温度が 1000 万 K を超えて水素の核融合が起こるようになった状態の恒星を何というか。最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　主系列星　　②　T タウリ型星
③　赤色巨星　　④　白色矮星

(5)　恒星の中心核でヘリウムの核融合が始まるのはどの段階か。最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　原始星　　②　惑星状星雲
③　白色矮星　　④　赤色巨星

(6) 太陽程度の質量をもつ恒星が進化する順序として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① 原始星→主系列星→白色矮星→赤色巨星→Ｔタウリ型星

② 原始星→Ｔタウリ型星→主系列星→赤色巨星→白色矮星

③ Ｔタウリ型星→原始星→主系列星→赤色巨星→白色矮星

④ 主系列星→Ｔタウリ型星→白色矮星→原始星→赤色巨星

PART6 さまざまな恒星の一生

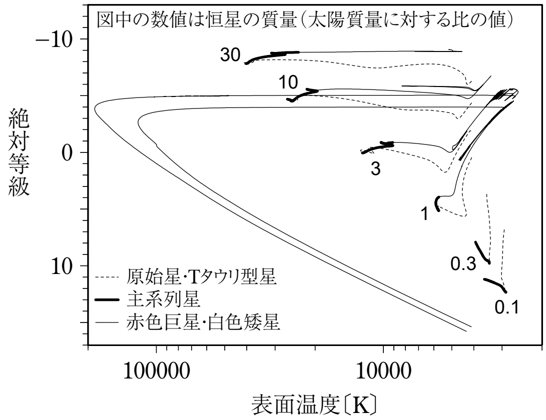
目標 さまざまな質量の恒星の一生について，各段階の名称を挙げて説明できる。

Chapter1　さまざまな恒星の一生

恒星には，さまざまな質量のものがあります。ここでは，恒星の一生が質量によってどのように異なるのかについて学びましょう。

恒星の進化の概要

・HR 図上での進化経路



小〜中質量星〔太陽質量の0.5倍〜8倍程度の恒星〕

・進化の順序とその時間スケール

原始星・T タウリ型星……（10^4 年 / 10^7 年 / 10^{10} 年）程度

→主系列星……………………（10^4 年 / 10^7 年 / 10^{10} 年）程度

→赤色巨星……………………（10^6 年 / 10^9 年 / 10^{12} 年）程度

→白色矮星 ……………………10^{10} 年以上

特に質量の小さな星〔太陽質量の0.5倍程度より軽い恒星〕

・進化の順序とその時間スケール

原始星・T タウリ型星……（10^6 年 / 10^9 年 / 10^{12} 年）程度

→主系列星……………………（10^6 年 / 10^9 年 / 10^{12} 年）程度

→白色矮星 ……………………10^{10} 年以上

知っておこう

太陽の質量は，しばしば単に「太陽質量」と表されます。

知っておこう

1961 年，日本の林忠四郎は，重力によって収縮している原始星〔T タウリ型星〕が HR 図上で上から下に向かって移動することを理論的に示しました。HR 図上でのこの移動経路を林トラックといい，この進化段階を林フェイズと呼びます。

知っておこう

各段階の時間スケールは，あくまで目安です。恒星の質量や元素組成などによって ± 1 桁程度は異なるので，数値を細かく覚えるのではなく，各段階の時間スケールの大小関係に着目してください。

大質量星〔太陽質量の8倍程度より重い恒星〕

・超新星爆発

恒星全体の爆発によって突然明るく輝く天体を**超新星**という。

超新星の成因の 1 つは大質量星が進化末期に起こす爆発現象であり，これを**超新星爆発**という。

・中性子星とブラックホール

大質量星が超新星爆発を起こすと，その中心部には高密度の天体が残される。そのうち中性子を主成分とする天体を**中性子星**といい，さらに高密度で光さえも脱出できない天体を**ブラックホール**という。

・進化の順序とその時間スケール

原始星………（10^4 年 / 10^7 年 / 10^{10} 年）程度
→主系列星……（10^4 年 / 10^7 年 / 10^{10} 年）程度
→赤色巨星……（10^6 年 / 10^9 年 / 10^{12} 年）程度
→超新星爆発
→中性子星またはブラックホール

知っておこう

大質量星は，赤色巨星内部の核融合により C や O に加えて Si, Mg, Fe といった重い元素を生成します。さらに，超新星爆発の際にも多くの重い元素が生成されるため，超新星爆発は宇宙の化学進化（化学組成の変化）に大きな影響を与えています。

知っておこう

大まかに言えば，質量の比較的小さな恒星が中性子星になり，質量の特に大きな恒星がブラックホールになります。

ただし，大質量星が最終的に中性子星となるかブラックホールとなるかには，質量だけでなく元素組成も影響していると考えられています。

まとめ

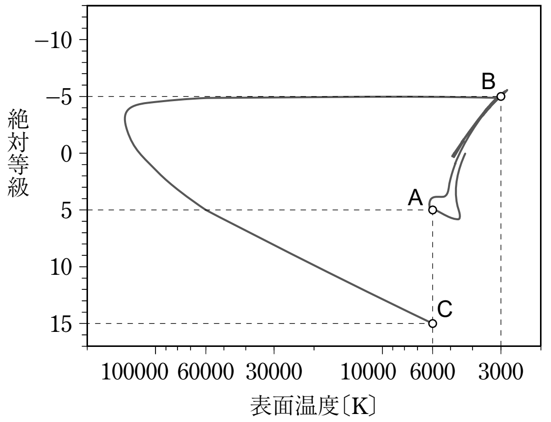
・小～中質量星は，原始星や T タウリ型星から主系列星を経て赤色巨星へと進化し，＿＿＿＿となって冷えていく。
・恒星全体の爆発によって突然明るく輝く天体を＿＿＿＿という。
・大質量星は，赤色巨星の段階のあとに＿＿＿＿＿＿を起こし，＿＿＿＿＿または＿＿＿＿＿＿＿＿＿となる。

知っておこう

大質量星は進化が非常に速く，原始星のまわりの星間ガスが晴れた頃には既に水素の核融合を開始しています。そのため，星間ガスが晴れているが核融合は始まっていない，という T タウリ型星の段階は存在しないと考えられています。

Chapter2　演習問題

　次の図は，恒星の進化経路を模式的に表したものです。ここでは，この図に関連してさまざまな恒星の性質について確認しましょう。



問題(1)　上の図について述べた次の文章中の空欄［　**ア**　］～［　**オ**　］に入る数値を答えましょう。また，（　　）について，正しいものを選びましょう。ただし，空欄に入る値が 1 より小さい場合は分数で答えましょう。また，A の半径は太陽の半径と同じだとします。

　主系列星 A が赤色巨星 B へと進化したとき，シュテファン・ボルツマンの法則によると，単位面積あたりの放射エネルギーは［　**ア**　］倍になっている。光度が［　**イ**　］倍になっていることとあわせると，B の表面積は A の表面積の［　**ウ**　］倍であり，B の半径は A の半径の［　**エ**　］倍だと推定される。太陽の半径を 70 万 km とすると，B の半径はおよそ（0.2 / 2 / 20）天文単位である。

　また，赤色巨星 B が白色矮星 C になったときについても同じように考えると，C の半径は A の半径の［　**オ**　］倍と推定される。つまり，C の半径は（地球の 10 分の 1 程度 / 地球と同程度 / 地球の 10 倍程度）である。

ここがPOINT

絶対等級が 5 等級異なると，光度は 100 倍異なります。

　また，表面積は半径の 2 乗に比例します。

問題⑵　白色矮星について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

問題⑴の結果にしたがうと，主系列星 **A** が白色矮星 **C** になったとき，体積は元のおよそ（100 / 1 万 / 100 万）分の 1 になる。**A** の平均密度が太陽と同じ約（0.14 / 1.4 / 14）g/cm^3 であるとすると，白色矮星 **C** の平均密度はおよそ（10^3 / 10^6 / 10^9）g/cm^3 と推定できる。

問題⑶　中性子星について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

大質量星は恒星風によって質量を失うほか，超新星爆発でも質量の大部分を失う。そのため，中性子星の質量は元の恒星の質量より小さく，太陽質量の 1.5 倍～ 2 倍程度だとされている。また，中性子星の半径は 12km 程度であり，これは太陽の半径の約（600 / 60000）分の 1 である。太陽の平均密度が約（0.14 / 1.4 / 14）g/cm^3 であることもあわせると，中性子星の平均密度はおよそ（5×10^8 / 5×10^{14}）g/cm^3 と推定できる。この値は，原子核の密度と同程度である。

知っておこう

太陽が放出するプラズマの流れを太陽風と呼ぶのと同様に，恒星が放出するプラズマの流れを恒星風と呼びます。

第20講　PART6　確認問題

問1　次の文章を読み，下の問いに答えよ。

太陽の（　ア　）倍程度より重い大質量星が，その進化の末期に a 超新星爆発を起こすと，中心部に高密度の天体が残される。そのうち，中性子を主成分とする天体を（　イ　），さらに高密度で光さえも脱出できない天体を（　ウ　）という。

(1)　空欄アに入る数として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　2　　②　8　　③　20　　④　100

(2)　下線部 a について，超新星爆発は恒星の進化のどの段階で起こるか。最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　原始星　　②　白色矮星
③　赤色巨星　　④　中性子星

(3)　空欄イ，ウに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　イ：超新星　　ウ：ブラックホール
②　イ：超新星　　ウ：中性子星
③　イ：中性子星　　ウ：ブラックホール
④　イ：中性子星　　ウ：超新星

＜ Note ＞

PART7 星団

目標 散開星団と球状星団の特徴を，星団内の恒星の種族を含めて説明できる。

Chapter1　星団

恒星は星間雲から形成されますが，1 つの星間雲につき 1 つの恒星が形成されるというわけではありません。ここでは，恒星の集まりである星団について学びましょう。

散開星団と球状星団

・**星団とは**

空間的に半径数十～ 100 光年程度の近い範囲にあって，重力によりまとまっている恒星の集まりを**星団**という。

多くの場合，星団を構成する恒星は形成された時期がほぼ同じだと考えられる。

知っておこう

星団の見かけの大きさは，実際の大きさだけでなく星団までの距離によっても変化します。大きなものでは，満月より大きく見えるものもあります。

・**散開星団**

（10^2 ～ 10^3 / 10^5 ～ 10^6）個程度の恒星が不規則に集まり，比較的まばらに見えるものを**散開星団**という。

散開星団は，星間雲を伴っていることが多い。

・**球状星団**

（10^2 ～ 10^3 / 10^5 ～ 10^6）個程度の恒星が密集して，まるく見えるものを**球状星団**という。

球状星団は，星間物質をほとんど伴わない。

恒星の種族と星団の年齢

・**恒星の種族**

種族Ⅰ……He より重い元素の割合が（大きい / 小さい）恒星

種族Ⅱ……He より重い元素の割合が（大きい / 小さい）恒星

→重い元素は恒星から放出されて宇宙に供給されるので，重い元素の割合が小さい（種族Ⅰ / 種族Ⅱ）の恒星は宇宙初期に誕生したと考えられる。

・**散開星団の年齢**

散開星団には赤色巨星が非常に少なく，進化の速い（中～大質量星 / 小質量星）を含む多くの恒星が主系列星の段階にある。（種族Ⅰ / 種族Ⅱ）の恒星からなる。

→星団の形成から時間があまり経っていない。

・**球状星団の年齢**

球状星団には赤色巨星が多く，主系列星の段階にあるのは（中～大質量星 / 小質量星）がほとんどである。（種族Ⅰ / 種族Ⅱ）の恒星からなる。

→星団の形成から長い時間が経っている。

知っておこう

宇宙形成直後において，宇宙には H と He 以外の元素がほとんど存在しませんでした。そのため，宇宙形成直後に形成された最初の恒星は He より重い元素を含まなかったと考えられています。このような恒星を種族Ⅲと呼びますが，今のところ観測によって確認された例はありません。

知っておこう

散開星団には，数百万年前に形成されたと考えられる新しいものがあります。その一方で，球状星団には，約 130 億年前に形成されたと推定されている非常に古いものがあります。

星団による年齢の違いは，それほど大きいのです。

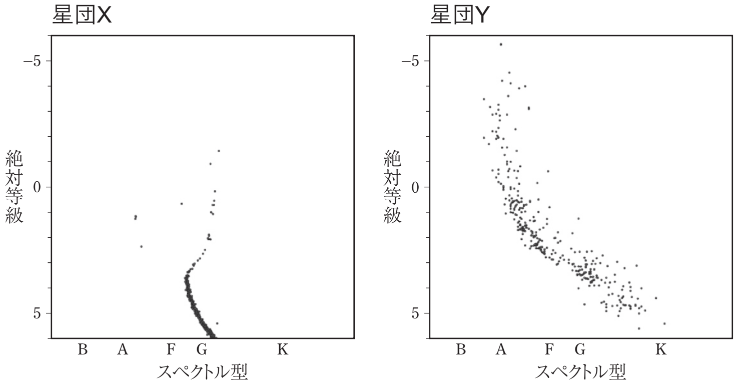
まとめ

・散開星団は，種族＿＿の恒星からなる若い星団で，多くの恒星が主系列星の段階にある。

・球状星団は，種族＿＿の恒星からなる古い星団で，多くの恒星が主系列星の段階を離れている。

Chapter2　演習問題

　次の図は，2 つの星団の HR 図です。ここでは，これらの図を用いて星団の特徴について確認しましょう。



問題⑴　2 つの星団の HR 図について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

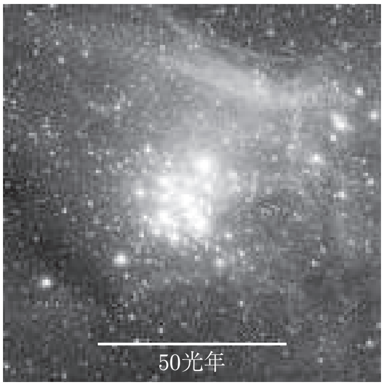
　星団 **X** の HR 図では，絶対等級の大きな部分において，恒星が左上から右下に向かう曲線状に分布している。これらの恒星は主系列星であり，比較的（明るく ／ 暗く），表面温度の（高い ／ 低い）恒星のみ主系列星の段階にあることがわかる。

　星団 **Y** の HR 図では，恒星が全体的に左上から右下に向かう曲線状に分布している。つまり，ほとんどの恒星が主系列星の段階にあるといえる。

　ここで，主系列星は絶対等級が小さいほど質量が（大きく ／ 小さく），寿命は（長い ／ 短い）。そのため，星団 **X** は質量の（大きな ／ 小さな）恒星が既に主系列星の段階から離れた古い星団であるといえる。星団 **Y** はほとんどの恒星が主系列星の段階にあるため，若い星団だと考えることができる。ヘリウムより重い元素をほとんど含まない（種族Ⅰ ／ 種族Ⅱ）の恒星からなるのは（星団 **X** ／ 星団 **Y**）である。

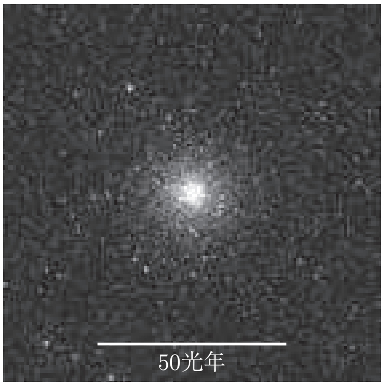
問題⑵　次の図は，それぞれ星団 X と星団 Y のうちいずれかの写真を示したものです。これらの図について述べた下の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

a



(ESO/G. Beccari)

b



(ESA/Hubble, Digitized Sky Survey 2)

上の図の a は明るい恒星が不規則に分布しており，（散開星団 / 球状星団）と呼ばれる星団である。全体的にぼんやりと光っているものは（散開星団 / 散光星雲）と呼ばれ，この領域は新しい恒星の形成される場所であることを示している。

また，上の図の b は多くの天体が対称的に分布しており，（散開星団 / 球状星団）と呼ばれる星団である。a のようなぼんやりと光る部分はなく，この領域では新しい恒星の形成は起こっていないと考えられる。

これらのことを**問題**⑴の結果とあわせると，上の図の a は（星団 X / 星団 Y），b は（星団 X / 星団 Y）の写真だと考えられる。

第 20 講 PART7　確認問題

問 1　次の文章を読み，下の問いに答えよ。

半径数十～ 100 光年程度の範囲にあって，重力によりまとまっている恒星の集まりを星団という。このうち，（　ア　）個程度の恒星が不規則に集まり，比較的まばらに見えるものを（　イ　）といい，星間雲を伴っていることが多い。また，数十万～数百万個程度の恒星が密集して，まるく見えるものを（　ウ　）といい，星間物質をほとんど伴わない。

He より重い元素の割合が大きい恒星を種族Ⅰといい，（　エ　）恒星である。一方，He より重い元素の割合が小さい恒星を種族Ⅱといい，（　オ　）恒星である。（　イ　）に属する恒星は（　カ　）で，（　ウ　）に属する恒星は（　キ　）である。

(1)　空欄ア～ウに入る数値や語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ア：10　　イ：散開星団　　ウ：球状星団

②　ア：10　　イ：球状星団　　ウ：散開星団

③　ア：100 ～ 1000　　イ：散開星団　　ウ：球状星団

④　ア：100 ～ 1000　　イ：球状星団　　ウ：散開星団

(2)　空欄エ～キに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　エ：若い　オ：年老いた　カ：種族Ⅰ　キ：種族Ⅱ

②　エ：若い　オ：年老いた　カ：種族Ⅱ　キ：種族Ⅰ

③　エ：年老いた　オ：若い　カ：種族Ⅰ　キ：種族Ⅱ

④　エ：年老いた　オ：若い　カ：種族Ⅱ　キ：種族Ⅰ

< Note >

PART8 連星

目標　連星とは何か，観測による確認の方法と関連付けて説明できる。

Chapter1　連星

太陽系に恒星は 1 つしかなく，惑星などがそのまわりを公転しています。しかし，宇宙には互いに公転運動をしている恒星も多く存在していることがわかっています。ここでは，そのような恒星である連星について学びましょう。

連星とその運動

・**連星とは**

2 つの恒星が互いに公転運動しているものを**連星**という。連星のうち明るい方を**主星**，暗い方を**伴星**という。

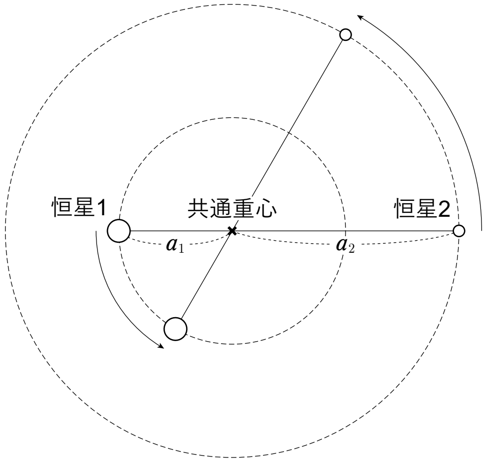
・**連星の運動**

連星の運動は，共通重心のまわりの公転運動とみなせる。

質量が m_1 の恒星 1 と質量が m_2 の恒星 2 が共通重心のまわりを公転するとき，恒星 1 の軌道長半径を a_1，恒星 2 の軌道長半径を a_2 とすると

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{m_2}{m_1}$$

が成り立つ。



知っておこう

太陽程度の質量をもつ主系列星の場合，およそ半数は連星となっていると考えられています。

なお，3 つ以上の天体が互いに公転している連星〔多重連星〕も知られています。

知っておこう

実際の連星の軌道は楕円軌道ですが，ここでは簡単のために真円として描いています。

連星の観測

・実視連星

望遠鏡により２つの天体が分離して観測され，それらが互いに公転運動していると確認された連星を実視連星という。

・分光連星

共通重心のまわりの公転運動により，連星をなす恒星は視線速度が周期的に変化する。視線速度が変化すると，恒星からの線スペクトルの波長が変化して見える。

特定の線スペクトルの波長が周期的に変化して見えることをもとに，２つの天体からなると推定される連星を**分光連星**という。

・食連星

視線方向と連星の公転面がほぼ（垂直 / 平行）なとき，連星をなす恒星のうち一方が他方の前を周期的に横切って見える。このとき，２つの恒星の光のうち一部が隠されるので，連星全体で見たときの明るさが小さくなる。

観測される明るさが周期的に変化して見えることをもとに，２つの天体からなると推定される連星を**食連星**という。

知っておこう

天体は３次元空間内を運動しており，その速度は空間内のベクトルとして表せます。このベクトルの視線方向（観測者から天体を見た方向）の成分を**視線速度**といいます。ただし，視線速度は観測者から遠ざかる向きを正とします。

知っておこう

電磁波について，視線速度が０のときの波長をλ_0，視線速度がvのときの波長を$\lambda_0 + \Delta\lambda$とすると，光速度を$c$として

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c}$$

が成り立ちます（ただし，$|v|$はcより十分小さいとします）。

つまり，観測される電磁波の波長を視線速度が０のときとくらべると，天体が観測者から離れる（$v>0$）ときは長く（$\Delta\lambda>0$），天体が観測者に近づく（$v<0$）ときは短く（$\Delta\lambda<0$）なります。これを**ドップラー効果**といいます。

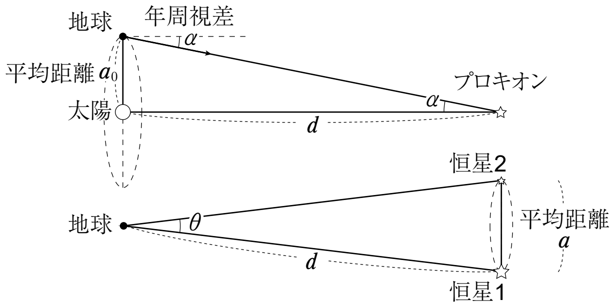
まとめ

- ２つの天体が互いに公転しているものを連星といい，そのうち明るい方を＿＿＿＿，暗い方を＿＿＿＿という。
- 特定の線スペクトルの波長が周期的に変化して見えることをもとに，連星だと推定されるものを＿＿＿＿＿＿という。
- 観測される明るさが周期的に変化して見えることをもとに，連星だと推定されるものを＿＿＿＿＿＿という。

Chapter2　演習問題

1 等星の 1 つであるプロキオンは，実視連星であることが知られています。ここでは，この連星をモデルとして，恒星の質量を推定する方法を確認しましょう。ただし，以下ではこの連星の主星を恒星 1，伴星を恒星 2 とします。また，簡単のために連星の公転軌道は円軌道であり，視線方向と垂直であるものとします。

問題⑴　次の図は，連星の見え方と年周視差の関係を表す模式図です。この図に関連して述べた下の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。



上の図において θ と α はいずれも非常に小さい角であり，図中の 2 つの三角形はいずれも半径 d の扇形によって近似することができる。半径の等しい扇形の弧の長さは中心角の大きさに比例するので，

$$\frac{\theta}{\alpha} = \frac{a}{a_0}$$

と表せる。

ここで，恒星 1 と恒星 2 は 4.5 秒角だけ離れて見える。また，恒星 1 や恒星 2 の年周視差は 0.30 秒角である。これらのことから，恒星 1 と恒星 2 の平均距離は（0.3 ／ 1.3 ／ 15 ／ 45）天文単位であることがわかる。

知っておこう

本問の数値はプロキオンに関する実際の観測結果をもとにしています（ただし，計算しやすいように一部の値を修正してあります）。

問題⑵ 恒星の質量について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。また，空欄［ **ア** ］～［ **ウ** ］に入る数値を小数第1位までの概数で答えましょう。

一般化したケプラーの（第1法則 / 第2法則 / 第3法則）より，2天体の平均距離を a〔天文単位〕, 公転周期を P〔年〕, 2天体の質量の和を M〔太陽質量〕とすると

$$\frac{a^3}{P^2} = M$$

と見積もることができる。

ここで，プロキオンの公転周期は41年であることがわかっている。よって，**問題⑴**の結果を用いると，恒星1と恒星2の質量の和は（0.5 / 1.0 / 2.0 / 4.0）太陽質量であることがわかる。

ところで，恒星1は共通重心のまわりを半径1.3秒角で公転している。このとき，恒星2は共通重心のまわりを半径［ **ア** ］秒角で公転している。これらのことから，恒星1の質量は［ **イ** ］太陽質量，恒星2の質量は［ **ウ** ］太陽質量であることがわかる。

第 20 講　PART8　確認問題

問 1　次の文章を読み，下の問いに答えよ。

　２つの恒星が共通重心のまわりを互いに公転運動しているものを連星といい，明るい方の星を（　ア　），暗い方の星を（　イ　）という。

(1)　空欄ア，イに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ア：主系列星　　イ：惑星
②　ア：主系列星　　イ：伴星
③　ア：主星　　　　イ：惑星
④　ア：主星　　　　イ：伴星

(2)　連星をなす２つの恒星 1，２のうち，恒星 1 の質量を m_1，軌道長半径を a_1 とし，恒星２の質量を m_2，軌道長半径を a_2 とする。このとき成り立つ式として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　$m_1 a_1 = m_2 a_2$
②　$m_1 a_2 = m_2 a_1$
③　$m_1 a_1^2 = m_2 a_2^2$
④　$m_1 a_2^2 = m_2 a_1^2$

問２　次の観測結果ウ～オから推定される連星の種類の組合せとして最も適当なものを，下の①～④のうちから一つ選べ。

ウ　望遠鏡による観測で２つの天体が分離して見える。

エ　線スペクトルの波長が周期的に変化して見える。

オ　観測される明るさが周期的に変化して見える。

①　ウ：分光連星　　エ：実視連星　　オ：食連星

②　ウ：実視連星　　エ：分光連星　　オ：食連星

③　ウ：実視連星　　エ：食連星　　オ：分光連星

④　ウ：食連星　　エ：分光連星　　オ：実視連星

第 21 講　銀河と宇宙
PART1 銀河系の構造

目標　銀河系の構造と，その中における星団の分布について説明できる。

Chapter1　銀河系の構造

太陽は，銀河系と呼ばれる恒星の集団に属しています。ここでは，銀河系の構造について学びましょう。

銀河系の構造

・**銀河と銀河系**

星間物質や 10^{10} ～ 10^{12} 個の恒星などが重力によって集まった天体を**銀河**という。

銀河のうち，太陽の属するものを**銀河系**という。銀河系には，（2000 / 2000 万 / 2000 億）個程度の恒星が存在する。

・**バルジ**

銀河系の中心付近にある長半径が約 1 万光年の楕円体状の部分には恒星が集まっており，この部分を**バルジ**という。

知ってておこう
銀河系の中心のことを，単に銀河中心と呼ぶことがあります。

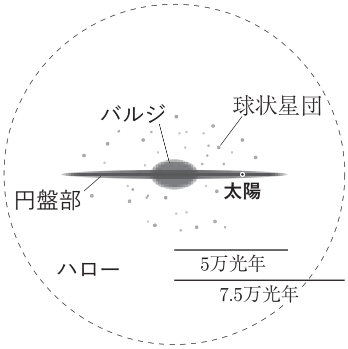
・**円盤部**

半径約 5 万光年，厚さ約 1000 光年の円盤状の部分には恒星や星間物質が集まっており，この部分を**円盤部**〔ディスク〕という。太陽は円盤部に属しており，地球から（天の赤道 / 流れ星 / 天の川）に見えるものが円盤部である。円盤部の広がる中心となっている面を**銀河面**という。

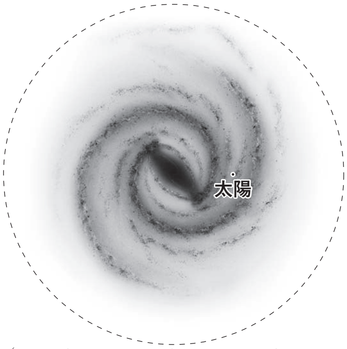
・**ハロー**

半径約 7 万 5000 光年の球状の部分には球状星団がまばらに分布しており，この領域を**ハロー**という。

銀河系の断面の模式図



左の図を上から見た想像図



（NASA/JPL–Caltech/R. Hurt (SSC/Caltech) による図をもとに作成）

銀河系内の物質の分布

・**バルジ**

いて座A*（スター）と呼ばれるブラックホール〔約400万太陽質量〕を中心として，そのまわりに（古い / 新しい）恒星が分布する。

・**円盤部**

古い恒星，新しい恒星，星間物質が分布し，何本かの腕からなる渦巻き構造を形作っている。（球状星団 / 散開星団）は円盤部に集中して分布する。

・**ハロー**

（古い / 新しい）恒星や球状星団が分布する。

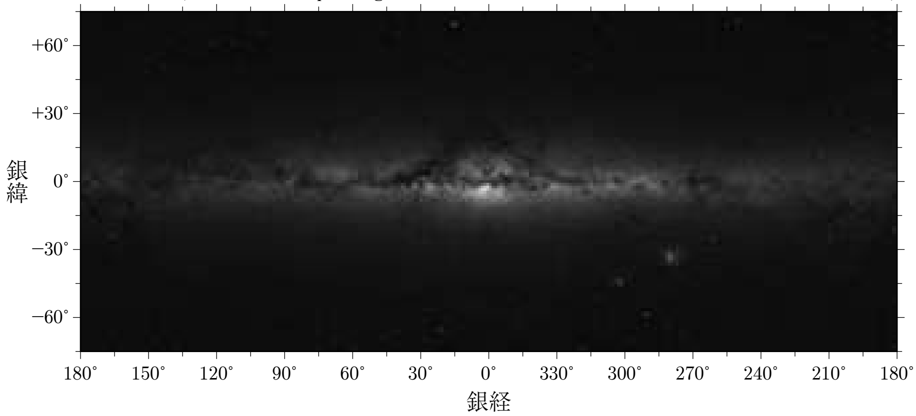
まとめ

・星間物質や2000億個程度の恒星などの集まった，太陽の属する銀河を________という。
・銀河系の中心にはいて座A*と呼ばれる____________があある。
・銀河系の中心付近の楕円体状の部分には恒星が集まっており，この部分を________という。
・散開星団は，銀河系の________に集中して分布する。
・球状星団は銀河系全体にまばらに分布し，この球状の領域を________という。

Chapter2　演習問題

次の図は，これまでに観測された10億個以上の天体について，位置や明るさを示した図です。ここでは，銀河系の構造や内部の天体について確認しましょう。

(NASA/Goddard Space Flight Center Scientific Visualization Studio. Gaia DR2: ESA/Gaia/DPAC)



問題(1)　銀河系の天体の分布について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

上の図は，銀経と銀緯を用いた銀河座標系により描かれている。銀河系の中心に向かう方向を0°として，そこから銀河面に沿って測った角度が銀経である。また，銀河面から離れる角度を符号付きで表したものが銀緯である。

上の図では，銀経によらず，銀緯（−30° / 0° / +30°）付近の帯状の部分が明るく見える。この部分を（バルジ / ハロー / 円盤部）という。また，その中でも銀経0°付近は特に明るく，銀緯のやや大きい部分にも天体が広がって分布している。これは，（バルジ / ハロー / 円盤部）の存在を示している。

さらに，明るい帯状の部分の中にも，暗いもやのような部分が存在する。これは，（ブラックホール / 星間物質）が多く分布し，光を吸収している部分にあたる。

知っておこう

図の銀経270°～300°，銀緯−30°～−45°付近で白くぼんやりと光っている2つの領域は，大マゼラン雲，小マゼラン雲と呼ばれるものです。名前は星間雲と紛らわしいですが，2つとも銀河系の近く（15万～20万光年）にある小規模な銀河です。

問題⑵　銀河系の観測の歴史について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

18世紀のハーシェルは，「すべての恒星の光度が同じであり，見かけの明るさの違いは距離の違いによる」と仮定することで，恒星までの距離を推定した。そして，太陽は銀河系の中心付近に位置しており，銀河系は半径4000光年程度のレンズ状であるという結論に至った。

20世紀になると，銀河系の全体に分布する（球状星団 / 散開星団）までの距離を測定する方法が確立された。これにより，太陽は銀河系の中心から約（3000光年 / 3万光年 / 30万光年）離れた位置にあり，銀河系は半径約（7500光年 / 7.5万光年 / 75万光年）の球状であることが明らかになった。

知っておこう

1785年，イギリスのハーシェル (William Herschel) は，銀河系の構造を推定した論文を発表しました。これはベッセルによって年周視差が測定されるよりも前のことであり，この当時は恒星までの距離を正しく測定する方法が存在しませんでした。そのため，恒星までの距離を推定するためには**問題⑵**にあるような仮定が必要だったのです。

問題⑶　さまざまな電磁波による銀河系の観測について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

星間雲は，電離していない水素原子である中性水素原子を多く含む。中性水素原子の分布は，波長が21cmの（X線 / 赤外線 / 電波）を用いて観測される。

また，銀河系の中心部を観測するためには，可視光線より波長の長い（電波や赤外線 / 赤外線や紫外線）だけでなく，可視光線より波長の短い（電波 / X線）も用いられる。

このように，銀河系の構造の研究にはさまざまな電磁波が利用されている。

第21講 PART1　確認問題

問1　次の文章を読み，下の問いに答えよ。

銀河系は，約（　ア　）個の恒星の集団である。中心には楕円体状のバルジがあり，その周囲には半径約（　イ　）光年の円盤部と，半径約（　ウ　）光年の球状の領域であるハローが広がっている。

バルジの中心には「いて座A*」と呼ばれる（　エ　）があり，そのまわりに（　オ　）恒星が分布する。円盤部には恒星や星間物質が渦巻き構造を形成している。また，ハローには（　カ　）恒星や（　キ　）が分布している。

(1)　空欄アに入る数として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　2000万　　②　20億
③　200億　　④　2000億

(2)　空欄イ，ウに入る数の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　イ：1万　　ウ：5万
②　イ：1万　　ウ：7万5000
③　イ：5万　　ウ：5万
④　イ：5万　　ウ：7万5000

(3)　空欄エ，オに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　エ：ブラックホール　　オ：新しい
②　エ：ブラックホール　　オ：古い
③　エ：赤色超巨星　　オ：新しい
④　エ：赤色超巨星　　オ：古い

⑷　空欄カ，キに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　カ：新しい　　キ：球状星団
②　カ：新しい　　キ：散開星団
③　カ：古い　　キ：球状星団
④　カ：古い　　キ：散開星団

PART2 銀河系の天体の運動

目標　銀河系の各構造に属する天体の運動について説明できる。

Chapter1　銀河系の天体の運動

太陽系の天体が太陽のまわりを公転しているように，銀河系の天体も運動しています。ここでは，銀河系の天体の運動のようすについて学びましょう。

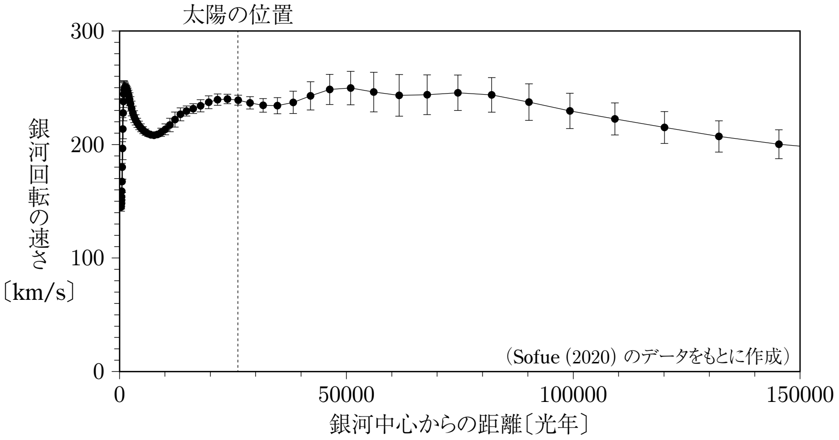
銀河回転

・**銀河回転とは**

銀河系の円盤部に多く分布する（種族Ⅰ ／ 種族Ⅱ）の恒星は，銀河中心を通る軸のまわりを星間物質とともに公転している。この運動を**銀河回転**という。

・**銀河系の回転曲線**

横軸に銀河中心からの距離，縦軸に銀河回転の速さを取ったグラフを銀河系の**回転曲線**という。



→半径約 5 万光年の円盤部だけでなく，その外側でも銀河回転の速さはあまり小さくならない。

・**銀河系の質量**

銀河中心から半径５万光年以内には，およそ（2000 ／ 2000万 ／ 2000億）太陽質量の物質が分布する。さらに外側の銀河回転の速さをもとにすると，銀河系の総質量はその（数倍 ／ 数千倍 ／ 数億倍）に達すると推定される。

この質量の違いは電磁波で観測される物質だけでは説明できない。そのため，銀河系には電磁波では観測されないが質量をもつ物質が存在すると考えられている。このような物質を**ダークマター**という。

銀河回転以外の運動

・**バルジ**

円盤部とくらべて，個々の天体の運動が乱雑である。

・**ハロー**

ハローに分布する（種族Ⅰ ／ 種族Ⅱ）の恒星や（散開星団 ／ 球状星団）の多くは，銀河面と（平行な ／ 垂直な ／ 斜交する）軌道を描いて運動している。

まとめ

- 円盤部の恒星や星間物質は銀河中心を通る軸のまわりを公転しており，この運動を＿＿＿＿＿という。
- 銀河系には電磁波で観測されないが質量をもつ物質が存在すると考えられており，このような物質を＿＿＿＿＿という。
- バルジは，円盤部とくらべて個々の天体の運動が乱雑である。
- ハローに分布する天体の多くは，銀河面と斜交する軌道を描いている。

Chapter2　演習問題

ここでは，銀河系内の天体の運動について確認しましょう。

問題⑴　銀河系における太陽の運動について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

太陽が銀河中心のまわりを等速円運動しているものとして，その周期を求めよう。

太陽が銀河中心から8000パーセクの距離にあるとする。このとき，地球から銀河中心にある天体を見たときの年周視差は（ $\frac{1}{8000}$ 秒角 / $\frac{1}{8000}$ 度 / 8000秒角 / 8000度）である。このことから，太陽が銀河中心のまわりを1周するときの円周の長さは約（1.0×10^4 / 1.0×10^7 / 1.0×10^{10} / 1.0×10^{13}）天文単位であることがわかる。

ここで，太陽の等速円運動の速さを240km/sとする。1天文単位を 1.5×10^8 km，1年を 3.2×10^7 秒とすると，太陽の円運動の周期は約（200万年 / 2000万年 / 2億年 / 20億年 / 200億年）であることがわかる。

復習

パーセク：
1パーセクは，年周視差が1秒角となる距離です。

ここがPOINT

年周視差と距離の関係を考えるときは，天体，地球，太陽の位置関係を表す模式図を描いてみましょう。

問題⑵　銀河系の質量の分布について述べた次の文章中の空欄［　**ア**　］·［　**イ**　］に入る式を答えましょう。また，（　　）について，正しいものを選びましょう。

銀河中心を中心とした半径 a の球の内側にある物質の質量がすべて銀河中心に集まっていると考えることで，銀河中心からの距離が a の位置における銀河回転のようすをケプラーの第 3 法則によって表すことができる。

一般化したケプラーの第 3 法則より，銀河中心からの距離を a〔天文単位〕，銀河回転の周期を P〔年〕，銀河中心を中心とする半径 a の球の内側にある物質の質量を M〔太陽質量〕とすると

$$\frac{a^3}{P^2} = M \quad \cdots\cdots①$$

と表せる。

また，銀河回転の速さを v〔天文単位 / 年〕とすると，v は a と P を用いて

$$v = [\quad \textbf{ア} \quad] \quad \cdots\cdots②$$

と表せる。

①式と②式より，M は a と v を用いて

$$M = [\quad \textbf{イ} \quad] \quad \cdots\cdots③$$

と表せる。

すなわち，v が a によらず一定であるとき，M は（ a / a^2 / a^3 ）に（比例 / 反比例）するといえる。この質量分布は電磁波での観測結果と整合的でなく，銀河系には電磁波で観測されないが質量をもつ物質があると考えられる。このような物質をダークマターといい，その正体についての研究が進められている。

知っておこう

ダークマターの候補としては，質量が小さく核融合を開始できなかった天体である褐色矮星のほか，超新星爆発の後に残された中性子星やブラックホール，さらに未知の素粒子などが挙げられています。しかし，現在までのさまざまな間接的な観測や理論によると，これらの候補物質によって銀河系のダークマターの総質量を説明することができていません。ダークマターの正体は，まだ謎のままなのです。

第21講 PART2　確認問題

問１　次の文章を読み，下の問いに答えよ。

　銀河回転は，銀河系の円盤部に分布する（　ア　）が銀河中心を通る軸のまわりを公転する現象である。回転曲線より，銀河中心から半径５万光年以内に約（　イ　）太陽質量の物質が分布することが確認されている。さらに外側の銀河回転の速さから，銀河系の総質量はその数倍に達すると推定されている。この質量の差異は a ダークマターの存在を示唆している。

　また，銀河回転以外に，b バルジやハローに分布する天体も運動している。

(1)　空欄アに入る語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ブラックホール　　②　球状星団
③　種族Ⅰの恒星　　④　種族Ⅱの恒星

(2)　空欄イに入る数として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　２億　②　20 億　③　200 億　④　2000 億

(3)　下線部ａについて，ダークマターとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　大量の電離した水素ガス
②　電磁波では観測されないが質量をもつ物質
③　ほとんどが中性子でできている物質
④　小さな固体微粒子と氷のかたまり

(4)　下線部ｂについて，バルジとハローに分布する天体の運動の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　バルジ：銀河面と斜交する軌道を描く運動
　　ハロー：円盤部と比較して乱雑に運動

②　バルジ：円盤部と比較して乱雑に運動
　　ハロー：銀河面と斜交する軌道を描く運動

③　バルジ：銀河面と平行な軌道を描く運動
　　ハロー：まわりを取り囲むような球形の軌道を描く運動

④　バルジ：まわりを取り囲むような球形の軌道を描く運動
　　ハロー：銀河面と平行な軌道を描く運動

PART3 さまざまな銀河

目標　さまざまな銀河を，その形態や放射に着目して分類することができる。

Chapter1　さまざまな銀河

銀河系は銀河の 1 つですが，すべての銀河が銀河系と同じような姿だというわけではありません。ここでは，宇宙にどのような銀河があるのかについて学びましょう。

銀河の形態による分類

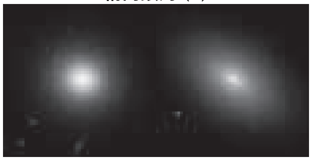
・**銀河のハッブル分類**

20 世紀前半にハッブルは銀河を形態によって分類した。これをハッブル分類という。

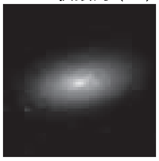
知っておこう

1926 年，アメリカのハッブル (Edwin Hubble) は，当時「星雲」と呼ばれていた天体を分類する論文を発表しました。そのうち「銀河系外の星雲」とされたものが銀河であり，その分類が現在ハッブル分類と呼ばれているものです。

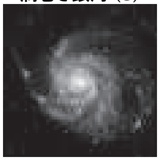
楕円銀河 (E)

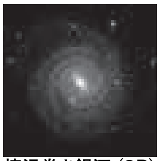


レンズ状銀河 (S0)



渦巻き銀河 (S)





棒渦巻き銀河 (SB)

E左 (NGC 4458): ESA, NASA and E. Peng (Peking University, Beijing)
E右 (NGC 4621): ESA/Hubble & NASA, P. Cote
S0 (NGC 3156): ESA/Hubble & NASA, R. Sharples, S. Kaviraj, W. Keel
S (NGC 5457): NASA, ESA, CXC, SSC, and STScI
SB (UGC 12158): ESA/Hubble & NASA

・**楕円銀河** (E)

形状が楕円状のものを**楕円銀河**という。

・**渦巻き銀河** (S)

球状のバルジと渦巻き構造をもつ円盤からなる銀河を**渦巻き銀河**という。

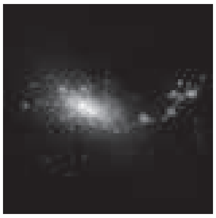
・**棒渦巻き銀河** (SB)

棒状のバルジと渦巻き構造をもつ円盤からなる銀河を**棒渦巻き銀河**という。銀河系は，棒渦巻き銀河に分類される。

知っておこう

レンズ状銀河 (S0) は，円盤部をもつが渦巻き構造をもたない銀河です。レンズ状銀河は星間物質の量が少なく，新しい恒星の形成はあまり起こっていません。

また，左の分類に当てはまらない，不規則な形の銀河は**不規則銀河** (Irr) と呼ばれています。



不規則銀河（Irr）

NGC1140:
ESA/Hubble & NASA

銀河の放射に着目した分類

・活動銀河核と活動銀河

銀河には，中心部の限られた領域から非常に強い電磁波を放射しているものがある。この領域を**活動銀河核**といい，活動銀河核をもつ銀河を**活動銀河**という。

活動銀河のエネルギーは，活動銀河核中心のブラックホールに落ち込む物質のもっていた重力の位置エネルギーが変換されたものだと考えられている。

・クェーサー

可視光線で非常に明るい活動銀河核を**クェーサー**という。クェーサーの多くは数十億光年以上の距離にある。

・セイファート銀河

クェーサーと似た明るい活動銀河核をもち，可視光線や赤外線の強い輝線などの特徴的なスペクトルを示す活動銀河を**セイファート銀河**という。

セイファート銀河は渦巻き銀河であることが多い。

・電波銀河

通常の銀河よりも強い電波を放射している活動銀河を**電波銀河**という。電波銀河は巨大な楕円銀河であることが多い。

まとめ

- 銀河のハッブル分類において，銀河系は________銀河に分類される。
- 可視光線で非常に明るい活動銀河核を________という。
- 可視光線や赤外線などに特徴的なスペクトルを示す活動銀河を____________という。
- 強い電波を放射する活動銀河を_________という。

知っておこう

クェーサーの多くは絶対等級が－20 等級よりも小さく，特に光度の大きなものでは－30 等級を下回るものも知られています。

知っておこう

1943 年, アメリカのセイファート (Carl Keenan Seyfert) は，一部の波長で通常の銀河とくらべて非常に強い電磁波を放射する銀河に関する論文を発表しました。セイファート銀河という名称は，彼の名前に由来しています。

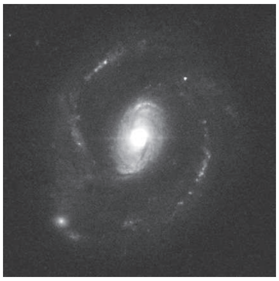
知っておこう

クェーサーからの電磁波の放射が銀河本体とくらべてはるかに大きいのに対して，セイファート銀河の活動銀河核からの放射は銀河本体と同程度です。また，クェーサーとくらべて，セイファート銀河は銀河系の近くに分布しています。

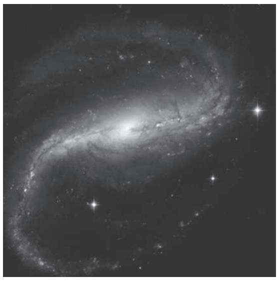
Chapter2　演習問題

次の図は，活動銀河を撮影したものです。ここでは，これらの図に見られるようなさまざまな銀河の性質について確認しましょう。

a

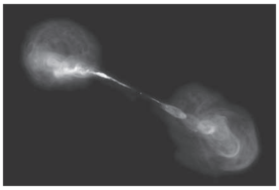


b



c

d



a（HE1239-2426）：NASA/ESA, ESO, Frédéric Courbin（Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Switzerland）& Pierre Magain（Universite de Liège, Belgium）
b（NGC 7479）：ESA/Hubble & NASA
c（3C 348）：NASA, ESA, S. Baum and C. O'Dea（RIT）, and the Hubble Heritage Team（STScI/AURA）
d（3C 348）：R. Perley and W. Cotton（NRAO/AUI/NSF）

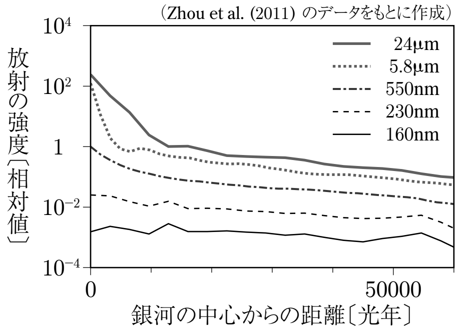
問題(1)　図の a について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。ただし，必要であれば $\log_{10} 2 = 0.3$，$\log_{10} 3 = 0.5$ を用いてかまいません。

上の図の a は可視光線で撮影されたものであり，その中心には明るい活動銀河核が見られる。この活動銀河核は約 3 億パーセクの距離にあり，可視光線での見かけの等級が約 15.5 等級である。絶対等級 M，見かけの等級 m，距離 d〔パーセク〕の関係式

$$M = m + 5 - 5\log_{10} d$$

を用いると，この活動銀河核の絶対等級は約（−32 / −27 / −22 / −17）等級と求められる。このような，可視光線で非常に明るい活動銀河核を（セイファート銀河 / クェーサー / 電波銀河）という。

問題⑵　次の図は，図の b について，銀河の中心からの距離と電磁波の放射の強度との関係を波長ごとに表したものです。b の活動銀河について述べた下の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。



写真で見ると，b の（楕円銀河 / 不規則銀河 / 棒渦巻き銀河）の中心部にも，a と同様に明るい領域が確認できる。

また，グラフによると，（紫外線 / 赤外線 / 電波）の放射の強度が銀河の中心からの距離によらずほぼ一定であるのに対して，（紫外線 / 赤外線 / 電波）の放射の強度は中心付近でのみ非常に強くなっている。

このように，明るい活動銀河核をもち，特徴的なスペクトルを示す銀河を（セイファート銀河 / クェーサー / 電波銀河）という。

問題⑶　図の c と d について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

図の c は可視光線，d は電波で同じ領域を撮影したものである。c の中心には（楕円銀河 / 不規則銀河 / 棒渦巻き銀河）があり，d の図では電波が 2 方向に放射されている様子を確認することができる。このように，通常の銀河より強い電波を放射している銀河を（セイファート銀河 / クェーサー / 電波銀河）という。

第21講　PART3　確認問題

問1　次の問いに答えよ。

(1)　銀河のハッブル分類は，銀河を何によって分類しているか。最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　距離　　②　形態　　③　大きさ　　④　明るさ

(2)　ハッブル分類では，銀河系は何銀河に分類されるか。最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　楕円銀河　　②　渦巻き銀河
③　棒渦巻き銀河　　④　レンズ状銀河

問2　次のア～ウの説明にあてはまる活動銀河の種類の組合せとして最も適当なものを，下の①～④のうちから一つ選べ。

ア　可視光線や赤外線の強い輝線などの特徴的なスペクトルを示す。渦巻き銀河であることが多い。

イ　通常の銀河より強い電波を放射している。巨大な楕円銀河であることが多い。

ウ　可視光線で非常に明るい活動銀河核で，多くは数十億光年の距離にある。

①　ア：セイファート銀河　イ：クェーサー　ウ：電波銀河
②　ア：電波銀河　イ：クェーサー　ウ：セイファート銀河
③　ア：クェーサー　イ：電波銀河　ウ：セイファート銀河
④　ア：セイファート銀河　イ：電波銀河　ウ：クェーサー

＜ Note ＞

PART4 宇宙の距離はしご

目標 天体の距離を測定するための代表的な方法を挙げ，どのような天体に用いるかを含めて説明できる。

Chapter1　宇宙の距離はしご

これまでに，宇宙にあるさまざまな距離の天体について学んできました。ここでは，天体の距離の測定法について学びましょう。

幾何学的な方法

・**年周視差による距離測定**

年周視差が距離に反比例することを用いて，恒星の距離を測定する。地球から数万光年までにある恒星の距離が求められている。

恒星の周期的な光度変化を用いる方法

・**脈動変光星**

赤色巨星がヘリウムの核融合を起こしているとき，恒星の大気が不安定になって膨張と収縮をくり返すことがある。それに伴って光度を変化させている恒星を**脈動変光星**という。

・**周期光度関係**

一部の脈動変光星は，変光周期と平均光度との間に一定の関係をもつことが知られている。この関係を**周期光度関係**という。

種類の例	恒星の種族	おもな星団
ケフェウス座δ型	（Ⅰ / Ⅱ）	（散開星団 / 球状星団）
こと座 RR 型	（Ⅰ / Ⅱ）	（散開星団 / 球状星団）

・**周期光度関係による距離測定**

星団に属する脈動変光星の変光周期から絶対等級を推定することで，見かけの等級と組み合わせて距離を求めることができる。

知っておこう

1908 年，アメリカのリービット (Henrietta Swan Leavitt) は，大マゼラン雲と小マゼラン雲に含まれる 1777 個の変光星をまとめた論文に，明るい変光星ほど変光周期が長いことを記しました。彼女はその後も変光星の研究を続け，現在も利用されている距離測定の基礎を構築しました。

知っておこう

1918 年，アメリカのシャプレー (Harlow Shapley) は，脈動変光星の周期光度関係を用いて求めた球状星団の分布をもとにして，銀河系の構造やその中での太陽の位置を明らかにしました。

脈動変光星は，地球から（数百万光年 / 数億光年 / 数百億光年）までにある星団の距離の推定に利用できる。

知っておこう

銀河系から最も近い銀河であるアンドロメダ銀河は，銀河系から約 250 万光年の距離にあります。

脈動変光星を利用すれば，銀河系内の星団だけでなく，他の銀河までの距離も推定できるのです。

特徴的な天体の光度を用いる方法

・**Ia 型超新星**

白色矮星と赤色巨星が近い距離で連星となっているとき，赤色巨星から白色矮星へと物質の流れが生じる。これによって白色矮星の質量が約 1.4 太陽質量を超えると，白色矮星が不安定となって爆発する。この爆発による超新星を **Ia 型超新星**という。

・**Ia 型超新星による距離測定**

Ia 型超新星の最大光度はほぼ一定であることが知られているため，銀河内に Ia 型超新星が出現すれば，その絶対等級を見かけの等級と組み合わせて距離を求めることができる。

Ia 型超新星は，地球から（数十万光年 / 数十億光年）までにある銀河の距離の推定に利用できる。

知っておこう

Ia 型超新星は，1 つの銀河につき数年～数万年に 1 回程度の頻度で現れると考えられています。そのため，距離を求めたい銀河に対してつねに利用できるというわけではないという点には注意が必要です。

宇宙の距離はしご

・**宇宙の距離はしご**

年周視差によって，地球に近い脈動変光星の距離を求める

→脈動変光星によって，地球に近い銀河の距離を求める

→ Ia 型超新星によって，地球から遠い銀河の距離を求める

のように，距離測定法をつなぎ合わせることで，遠方の天体の距離を推定することができる。これを宇宙の距離はしごという。

まとめ

・地球に近い恒星の距離は，＿＿＿＿＿を用いて測定することができる。

・銀河系内外の星団の距離は，＿＿＿＿＿の周期光度関係を用いて推定することができる。

・遠方の銀河の距離は，連星を構成していた白色矮星が爆発して生じる＿＿＿＿＿の光度から推定できる。

Chapter2　演習問題

次の表は，2 つのケフェウス座δ型変光星 A，B についての観測結果です。ここでは，この例を用いて宇宙の距離はしごについて確認しましょう。

ただし，$\log_{10} 2 = 0.3$，$\log_{10} 3 = 0.5$ とします。

	年周視差	見かけの等級	変光周期
変光星 A	0.0020 秒角	4.0 等級	3.0 日
変光星 B	0.0025 秒角	0.5 等級	30 日

問題(1)　年周視差を用いた距離測定と絶対等級の推定について述べた次の文章中の空欄［　ア　］～［　エ　］に入る数値を答えましょう。

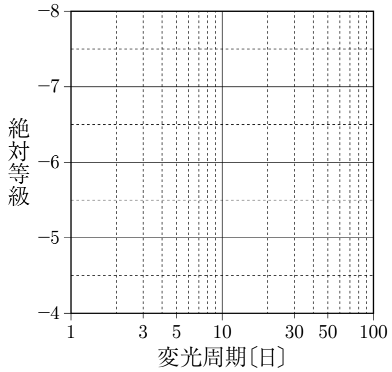
年周視差の観測結果をもとに，変光星 A の距離は［　ア　］パーセクと求められる。また，絶対等級を M，見かけの等級を m，距離を d〔パーセク〕としたときの関係式

$$m - M = 5 \log_{10} \frac{d}{10} \qquad \cdots\cdots①$$

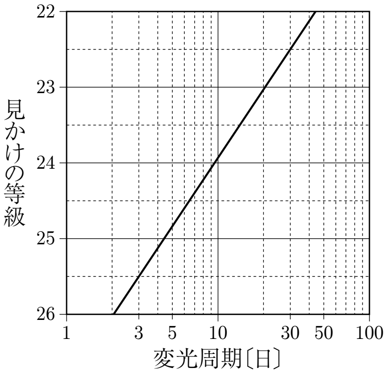
を用いると，変光星 A の絶対等級は［　イ　］等級と求められる。

同様にして，変光星 B の距離は［　ウ　］パーセク，絶対等級は［　エ　］等級であることがわかる。

問題(2)　問題(1)の結果と表をもとにして変光星 A，B のデータを次の図に●で示し，2 つの●を通る直線を描きましょう。



問題⑶　次の図は，ある銀河 G について，ケフェウス座 δ 型変光星の周期光度関係を求めたものです。銀河 G の距離について述べた下の文章中の空欄［　**オ**　］に入る数値を答えましょう。



ケフェウス座 δ 型変光星の周期光度関係が**問題⑵**の直線で表されるものとする。このとき，銀河 G に属するさまざまな変光周期のケフェウス座 δ 型変光星のそれぞれについて**問題⑴**の①式が成り立つと考えることができる。変光周期によらず $m-M$ の値は一定であり，銀河 G の距離は［　**オ**　］パーセクと求められる。

問題⑷　Ia 型超新星による距離測定について述べた次の文章中の空欄［　**カ**　］に入る数値を答えましょう。

Ia 型超新星は，最大光度がほぼ一定であることが知られている。すなわち，Ia 型超新星の最も明るくなったときの絶対等級は一定だとみなすことができる。

問題⑶の銀河 G と，別の銀河 H では，ほぼ同時に Ia 型超新星が観測された。それらの Ia 型超新星が最も明るくなったときの見かけの等級を比較したところ，銀河 H のものの方が 10 等級大きかった。このことをもとにすると，銀河 H の距離は［　**カ**　］パーセクと求められる。

第21講　PART4　確認問題

問１　次の文章を読み，下の問いに答えよ。

天体の距離を測定するにはいくつかの方法がある。まず，幾何学的な方法として，$_{\mathrm{a}}$ 年周視差を用いた方法があり，近傍の恒星までの距離がわかる。次に，（　ア　）の $_{\mathrm{b}}$ 周期光度関係を利用する方法では，銀河系内外の星団までの距離を測定できる。赤色巨星と連星をなす白色矮星の爆発による（　イ　）の最大光度がほぼ一定であることを用いる方法では，さらに遠くの銀河までの距離の推定が可能である。

(1)　下線部ａについて，この方法は年周視差のどのような性質を利用しているか。最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　距離に比例する。
②　距離の２乗に比例する。
③　距離に反比例する。
④　距離の２乗に反比例する。

(2)　空欄アに入る語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　食連星　　②　原始星
③　主系列星　　④　脈動変光星

(3)　下線部ｂについて，周期光度関係の説明として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　変光周期と絶対等級の関係
②　変光周期と見かけの等級の関係
③　公転周期と絶対等級の関係
④　公転周期と見かけの等級の関係

⑷　空欄イに入る語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　白色矮星　　②　赤色巨星

③　Ⅰa型超新星　　④　クェーサー

PART5 宇宙の階層構造

目標 銀河群，銀河団，超銀河団とは何か，また，宇宙の大規模構造とはどのようなものかを説明できる。

Chapter1　宇宙の階層構造

銀河の距離を正確に求められるようになると，宇宙における銀河の分布がわかります。ここでは，宇宙における銀河の分布について学びましょう。

重力によるまとまり

・銀河群と銀河団

銀河が重力によって 1 つの集団を作っているものを**銀河群**や**銀河団**という。銀河群や銀河団の空間スケールは，（ $10^4 \sim 10^5$ ／ $10^6 \sim 10^7$ ）光年である。

銀河群……銀河の数がおよそ（100 個 ／ 1 万個）より少ないもの

銀河団……銀河の数がおよそ（100 個 ／ 1 万個）より多いもの

・局部銀河群

銀河系は，大マゼラン雲，小マゼラン雲，アンドロメダ銀河などとともに 1 つの銀河群を形成している。この銀河群を**局部銀河群**という。

知っておこう

局部銀河群を構成する銀河のうち最大のものはアンドロメダ銀河であり，2 番目に大きいものが銀河系です。

局部銀河群には数十個の銀河が属していますが，その多くは直径が 1 万光年に満たない小さな銀河です。

宇宙の大規模構造

・超銀河団

銀河群や銀河団は緩やかに集まってまとまりをなしている。このまとまりを**超銀河団**という。超銀河団の空間スケールは，（ $10^6 \sim 10^7$ ／ $10^8 \sim 10^9$ ）光年である。

・おとめ座超銀河団

局部銀河群は，おとめ座銀河団などとともに 1 つの超銀河団を形成している。この超銀河団を**おとめ座超銀河団**という。

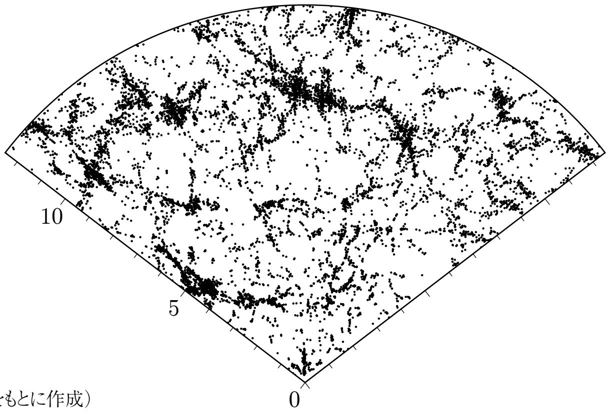
・**宇宙の大規模構造**

超銀河団は宇宙空間の中で泡の表面のように連なって分布する。この構造を**宇宙の大規模構造**といい，泡の内側にあたって銀河の分布しない部分を**ボイド**という。それぞれのボイドの空間スケールは, (10^6 / 10^8 / 10^{10}) 光年程度である。

宇宙の大規模構造は，銀河系から少なくとも数十億光年の距離まで続いていることがわかっている。

知ってておこう

ボイドは「空洞」を表す英語の void に由来しています。



（SDSS−III のデータをもとに作成）

まとめ

・銀河が重力によって集団を作っているもののうち，銀河の数がおよそ 100 個より少ないものを＿＿＿＿＿といい，それより多いものを＿＿＿＿＿という。
・銀河系の属する銀河の集団を＿＿＿＿＿＿という。
・銀河の集団が形成するまとまりを＿＿＿＿＿＿といい，そのうち銀河系が属するものを＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿と呼ぶ。
・銀河の集団が形成するまとまりは泡の表面のように連なって分布しており，その構造を宇宙の＿＿＿＿＿＿＿＿，銀河の分布しない空洞部を＿＿＿＿＿という。

Chapter2　演習問題

ここでは，宇宙の空間スケールについて確認しましょう。

問題(1)　太陽の大きさと 1 天文単位について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。また，空欄［　**ア**　］に入る数値を上から 1 桁の概数で答えましょう。

ここでは，太陽の大きさと 1 天文単位との関係を考えよう。

太陽の視直径は，約（ 30′′ / 30′ ）である。よって，円周率を 3 とすると，1 天文単位は太陽の直径の約［　**ア**　］倍であることがわかる。

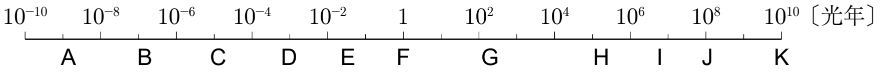
問題(2)　1 天文単位と 1 光年について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。また，空欄［　**イ**　］に入る数値を上から 1 桁の概数で答えましょう。

1 天文単位は太陽と地球の平均距離，1 光年は光が 1 年間に進む距離である。ここでは，1 天文単位と 1 光年との関係を考えよう。

光の太陽から地球までの所要時間は，約（ 3 秒 / 8 分 20 秒 ）である。よって，1 年を 3×10^7 秒とすると，1 光年は約［　**イ**　］天文単位であることがわかる。

問題⑶　**問題⑴**と**問題⑵**の結果を参考にして，以下に挙げる天体①～⑦の大きさが下の図の A ～ K のどの位置にあたるのかを答えましょう。ただし，ここで天体の大きさは直径を表すものとします。

① 地球
② 太陽
③ 太陽系〔惑星の公転する領域〕
④ 太陽系〔オールトの雲として想定される領域〕
⑤ 銀河系
⑥ 局部銀河群
⑦ おとめ座超銀河団



第21講　PART5　確認問題

問1　次の文章を読み，下の問いに答えよ。

銀河どうしは（　ア　）によってまとまり，a銀河群や銀河団という集団を形成している。特に，銀河系を含んでいる銀河群は（　イ　）とよばれる。銀河群や銀河団はさらに集まって超銀河団を形成しており，（　イ　）や（　ウ　）銀河団は（　ウ　）超銀河団に含まれる。超銀河団は，宇宙空間の中で泡の表面のように広がっており，このような構造を宇宙の大規模構造という。泡の内側には銀河がほとんど分布しない部分があり，これを（　エ　）とよぶ。

(1)　空欄アに入る語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　磁力　　②　クーロン力　　③　摩擦力　　④　重力

(2)　下線部ａについて，銀河群に含まれる銀河の数として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　数十個　　②　数百個　　③　数万個　　④　数億個

(3)　空欄イ，ウに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　イ：局部銀河群　　ウ：おとめ座
②　イ：局部銀河群　　ウ：かみのけ座
③　イ：おとめ座銀河群　　ウ：おとめ座
④　イ：おとめ座銀河群　　ウ：かみのけ座

(4)　空欄エに入る語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ディスク　　②　ボイド　　③　ハロー　　④　バルジ

< Note >

PART6 ハッブル・ルメートルの法則

目標　銀河の後退速度の求め方や，その後退速度と銀河までの距離との関係について説明できる。

Chapter1　ハッブル・ルメートルの法則

宇宙に分布する銀河の位置関係は，つねに変化しています。ここでは，その変化のようすや，そこからわかることについて学びましょう。

銀河の後退速度

・**赤方偏移**

銀河のスペクトルを観測すると，ほとんどの銀河について，線スペクトルの位置〔波長〕が本来の位置より波長の（長い / 短い）方にずれて見える。これを**赤方偏移**という。

・**赤方偏移の表し方**

ある銀河のスペクトルについて，静止しているときの波長を λ_0，観測される波長を $\lambda_0 + \Delta\lambda$ としたとき，

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$$

で表される値 z は線スペクトルによらず一定であり，**赤方偏移**と呼ばれる。

・**赤方偏移と後退速度**

多くの銀河は地球から見て遠ざかっており，その視線速度を**後退速度**という。$|z|$ が 1 より十分小さいとき，光速度 c，後退速度 v，赤方偏移 z の間には

$$z = \frac{v}{c}$$

が成り立つ。

→赤方偏移を観測すれば，銀河の後退速度が求められる。

知っておこう

特殊相対性理論に基づき，z の値によらず

$$z = \sqrt{\frac{c+v}{c-v}} - 1$$

と表せることが知られています。$|z|$が 1 より十分小さいときは，これを本文中に示したような簡単な形で近似できるのです。

ハッブル・ルメートルの法則

・ハッブル・ルメートルの法則

銀河の後退速度は銀河の地球から見た方向によらず，銀河までの距離に（比例 / 反比例）している。すなわち，銀河の後退速度を v，銀河までの距離を r とすると，定数 H_0 を用いて

$$v = H_0 r$$

と表せる。

これを**ハッブル・ルメートルの法則**といい，H_0 を**ハッブル定数**という。近年の研究では $H_0 \fallingdotseq 70\mathrm{km/s/Mpc}$ とされている〔ただし，pc はパーセクを表し，$1\mathrm{Mpc} = 1 \times 10^6$ pc〕。

・宇宙膨張

銀河が方向によらず遠ざかっていることは，宇宙全体が膨張していると考えれば説明できる。これを**宇宙膨張**という。

・ハッブル時間

宇宙が現在と同じ速度で膨張し続けてきたとすると，過去のある時刻で宇宙は 1 点に集まっていたことになる。この時刻から現在までの時間をハッブル時間といい，宇宙の年齢の目安となる。

・宇宙の地平線

光速度 c と宇宙の年齢 t_0 はともに有限なので，地球から観測できる宇宙には限りがある。その限界を示す，地球を中心とする半径 ct_0 の球を**宇宙の地平線**という。

知っておこう

1927 年，ベルギーのルメートル (Georges Lemaître) は，アインシュタインの一般相対性理論をもとにして宇宙が膨張しているという解を導き，それによって銀河の後退速度と銀河までの距離との比例関係を説明しました。しかし，彼の論文はベルギーの雑誌にフランス語で掲載されたため，しばらくの間は脚光を浴びませんでした。

1929 年，アメリカのハッブル (Edwin Hubble) は，銀河の後退速度と銀河までの距離の関係を散布図に描き，それらが原点を通る直線によって近似されることを示しました。また，その結果を宇宙の膨張と関連付けました。ハッブル定数は彼の名前に因んで名づけられたものです。

まとめ

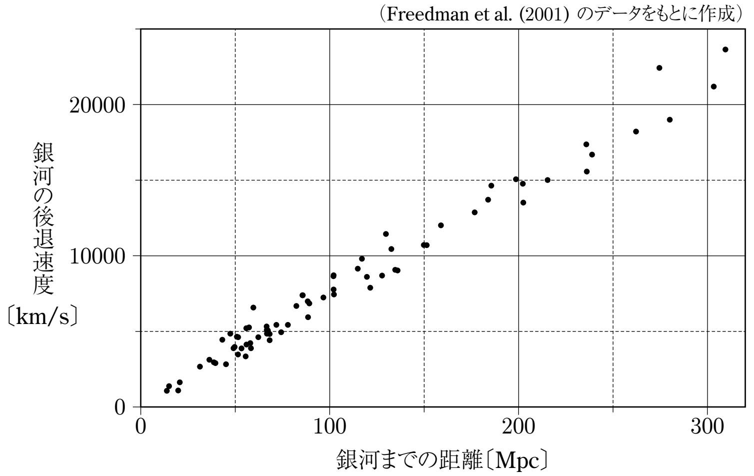
- ほとんどの銀河は地球から遠ざかっており，その後退速度は＿＿＿＿＿＿＿＿をもとに求められる。
- 銀河の後退速度は銀河までの距離に比例しており，このことを＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿の法則という。
- この法則は，宇宙が＿＿＿＿＿していることを示している。

Chapter2　演習問題

ここでは，ハッブル・ルメートルの法則と，それに関連することがらについて確認しましょう。

問題(1)　次の図は，銀河までの距離と銀河の後退速度との関係を示しています。この図について述べた下の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

（Freedman et al. (2001) のデータをもとに作成）



ハッブル・ルメートルの法則は，銀河までの距離を r，銀河の後退速度を v，ハッブル定数を H_0 としたとき，

$$v = H_0 r \quad \cdots\cdots ①$$

が成り立つという法則である。

上の図から得られるハッブル定数 H_0 の値は, およそ（20 / 70 / 200 / 700）km/s/Mpc である。この H_0 の単位は, 銀河までの距離が（1km / 1Mpc）大きくなるごとに，後退速度が何 km/s だけ大きくなるかを表している。

問題(2) ハッブル時間について述べた次の文章中の空欄［ **ア** ］・［ **イ** ］に入る式を答えましょう。また，空欄［ **ウ** ］に入る数値を上から1桁の概数で答えましょう。

宇宙が1点から始まり，現在と同じように膨張し続けてきたと仮定する。また，宇宙が誕生してから現在までの時間を t_{H} とする。

このとき，それぞれの銀河は，銀河系からの後退速度 v を保ち，t_{H} の時間をかけて距離 r だけ離れたと考えることができる。すなわち，r は v と t_{H} を用いて

r ＝［ **ア** ］ ……②

と表せる。①式と②式より，

t_{H} ＝［ **イ** ］ ……③

が得られる。$1\mathrm{Mpc} = 1 \times 10^6\ \mathrm{pc}$，$1\mathrm{pc} = 3$ 光年，光速度 $c = 3 \times 10^5\ \mathrm{km/s}$ とすると，**問題(1)**と③式より

t_{H} ＝［ **ウ** ］年

と求められる。この時間をハッブル時間と呼ぶ。

ここがPOINT

1光年は，光速度で進んだときに1年かかる距離です。そのため，距離が光年の単位で表されているとき，速さが光速度の何倍かがわかれば，所要時間を年の単位で求めることができます。

問題(3) 赤方偏移について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

ある銀河のスペクトルについて，静止しているときの波長を λ_0，観測される波長を $\lambda_0 + \Delta\lambda$ としたとき，

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$$

で表される値 z を赤方偏移と呼ぶ。

ここで，赤方偏移は宇宙膨張によって空間が広がることによって生じるものである。よって，赤方偏移が z の光は，放射されてから現在までに宇宙の大きさが（ z ／ $1 + z$ ／ $1 - z$ ）倍になったことを示している。

ここがPOINT

講義で学んだように，赤方偏移は，ハッブル・ルメートルの法則にある銀河の後退速度を求めるために利用されます。

問題(3)は，赤方偏移を過去の宇宙の大きさの推定に利用することもできる，ということを表しています。

第 21 講　PART6　確認問題

問 1　次の文章を読み，下の問いに答えよ。

ある銀河のスペクトルについて，静止しているときの波長を λ_0，観測される波長を $\lambda_0 + \Delta\lambda$ とすると，$z = \dfrac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$ は線スペクトルによらず一定の値をとり，(　ア　）と呼ばれる。$|z|$ が 1 より十分に小さいとき，z は，銀河の後退速度 v と光速度 c を用いて，$z =$ (　イ　）と表される。

銀河の後退速度は，地球からの距離に比例する。これを（　ウ　）の法則といい，a 宇宙全体が膨張していることを示している。

(1)　空欄ア，イに入る語句または式の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ア：赤方偏移　　イ：$\sqrt{cv}$

②　ア：赤方偏移　　イ：$\dfrac{v}{c}$

③　ア：青方偏移　　イ：$\sqrt{cv}$

④　ア：青方偏移　　イ：$\dfrac{v}{c}$

(2)　空欄ウに入る語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　シュテファン・ボルツマン

②　ケプラー

③　ハッブル・ルメートル

④　ドップラー

⑶　下線部 a について，宇宙が現在と同じ速度で膨張し続けてきたと仮定したとき，宇宙が 1 点に集まっていたことになる時刻を考えることができる。このことから何を推測することができるか。最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　恒星の寿命　　　②　宇宙の年齢

③　銀河の数　　　④　宇宙の地平線までの距離

PART7 宇宙の誕生と進化

目標　ビッグバンモデル，3K宇宙背景放射，ダークエネルギーとは何か，それぞれ説明できる。

Chapter1　宇宙の誕生と進化

ハッブル・ルメートルの法則により，宇宙は膨張してきたことが推定されます。ここでは，初期の宇宙や，そこから現在までの宇宙の進化について学びましょう。

ビッグバンモデル

・ビッグバンモデル

宇宙は約（46億年 / 138億年）前に超高温・超高密度の点のような状態から始まったとされる。この宇宙の始まりを**ビッグバン**といい，その膨張により宇宙が現在のすがたになったという考え方を**ビッグバンモデル**という。

・ビッグバンモデルによる宇宙の進化

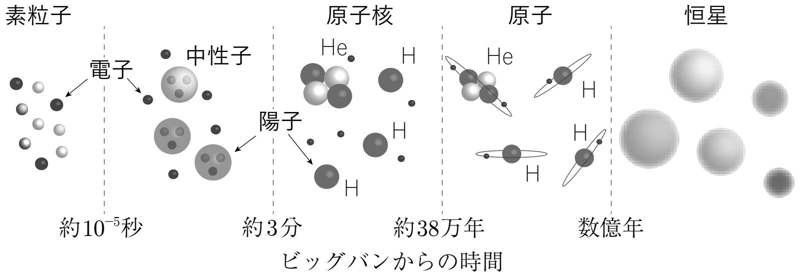
宇宙の膨張とともに温度と密度が低下していき，粒子の結合が起こっていった。

ビッグバンから約38万年後には，宇宙の温度が約（3K / 3000K / 300万K）まで低下した。そのため，宇宙空間の電子が原子核のまわりを回るようになり，自由に飛び回る電子がほとんどなくなった。これによって光が直進できるようになったことを**宇宙の晴れ上がり**という。

知っておこう

ビッグバンにおける元素の合成をビッグバン元素合成といいます。このとき，温度と密度が急速に低下していくために重い元素は合成されません。

宇宙におけるヘリウムの存在比は恒星内部の核融合だけから予想されるよりも多く，ビッグバン元素合成を考えることでうまく説明されます。このことは，ビッグバンモデルを支持する根拠の1つとなっています。



3K宇宙背景放射

・3K 宇宙背景放射とは

宇宙のあらゆる方向から観測される，温度 2.7K のほぼ完全な黒体放射に相当する電磁波を **3K 宇宙背景放射**という。

この放射は，宇宙の晴れ上がりの時点における宇宙の電磁波が，宇宙の膨張によって引き延ばされたものである。

・3K 宇宙背景放射の意味

等方的であることから，宇宙に特別な方向がないことがわかる。

また，宇宙の晴れ上がりの時点と比較すると温度が約（ 10^3 分の 1 / 10^6 分の 1 ）になっており，（シュテファン・ボルツマンの法則 / ウィーンの変位則）によると電磁波の波長は元の波長の約（ 10^3 倍 / 10^6 倍）になっている。これは，宇宙の膨張とともに温度と密度が低下したとするビッグバンモデルと整合的である。

・宇宙の加速膨張とダークエネルギー

銀河の距離測定が精密になるとともに，宇宙の膨張が加速されていることがわかってきた。この加速を担うエネルギーは現在のところわかっておらず，**ダークエネルギー**と呼ばれている。

3K 宇宙背景放射の詳細な観測により，宇宙は 5% が通常の物質，27% がダークマター，68% がダークエネルギーによって構成されていると考えられている。

まとめ

・宇宙が超高温・超高密度の状態から膨張して現在の状態になったとする考え方を＿＿＿＿＿＿モデルという。

・宇宙のあらゆる方向から観測される約 2.7K の黒体放射に相当する電磁波を＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿という。

・宇宙の膨張は加速されており，それを担う未知のエネルギーを＿＿＿＿＿＿＿＿＿という。

知っておこう

1965 年，アメリカのペンジアス (Arno Allan Penzias) とウィルソン (Robert Woodrow Wilson) は，宇宙のすべての方向から，同じ強さの未知の電磁波がつねに観測されることを発見しました。

なお，その放射をビッグバンと結びつける論文は，アメリカのディッケ (Robert H. Dicke) らによって，同じ雑誌の同じ号に発表されました。

知っておこう

3K 宇宙背景放射には，正規分布にしたがう約 10^{-5} K のゆらぎが確認できます。このゆらぎは宇宙最初期に爆発的な膨張が存在したとする**インフレーション理論**によって説明され，その後の宇宙の構造の起源となったと考えられています。

知っておこう

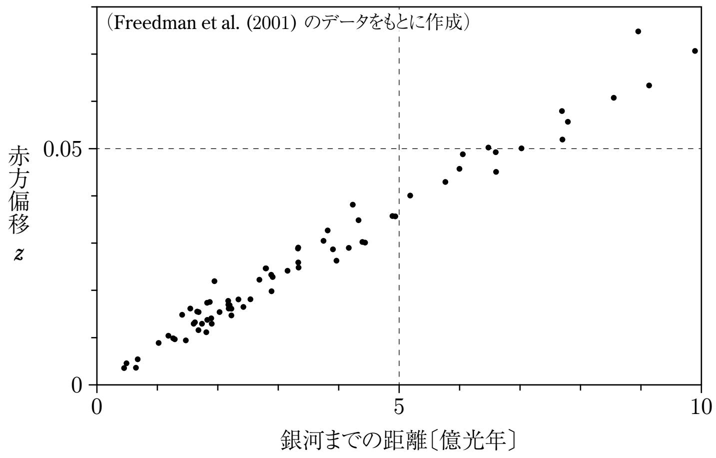
宇宙の構成として物質とエネルギーを並べることには違和感があるかもしれません。

質量 m とエネルギー E との間には，光速度を c として $E = mc^2$ の関係が成り立ちます。すなわち，質量はそれに対応するエネルギーに，また，エネルギーはそれに対応する質量に，それぞれ書き換えることができるのです。

Chapter2　演習問題

ここでは，宇宙の膨張について確認しましょう。

問題(1)　次の図は，銀河までの距離と赤方偏移との関係を示しています。この図について述べた下の文章中の空欄［　**ア**　］～［　**ウ**　］に入る数値を答えましょう。ただし，［　**ア**　］と［　**ウ**　］は小数第２位まで，［　**イ**　］は整数で答えましょう。



赤方偏移は，銀河の後退速度と比例する。よって，この図で銀河までの距離と赤方偏移との関係が原点を通る直線によって近似されることは，銀河までの距離と後退速度が比例するというハッブル・ルメートルの法則が成り立つことに対応する。

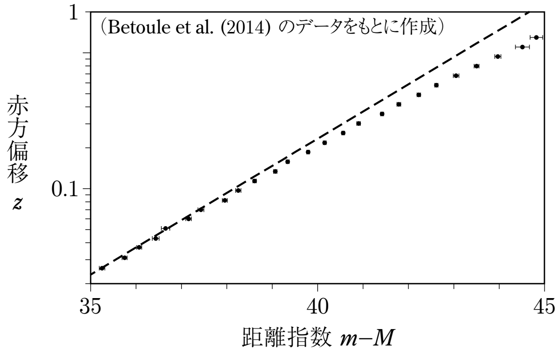
ここで，8 億光年の距離にある銀河の赤方偏移 z はグラフより［　**ア**　］である。よって，$z=$［　**ア**　］の銀河からの光は，［　**イ**　］億年前に放射されたものだといえる。このことから，［　**イ**　］億年前の宇宙の大きさは，現在の宇宙の約［　**ウ**　］倍であったと考えることができる。

知っておこう

天文学において，距離と年代が対応付けられることは非常に重要です。

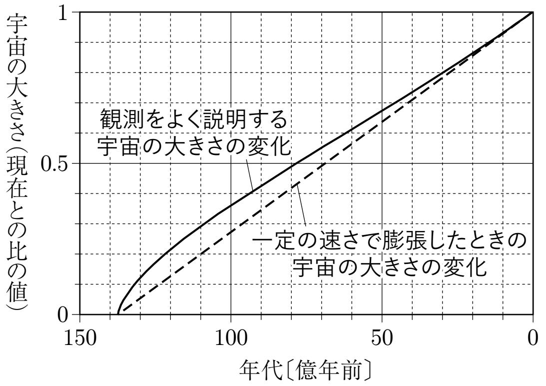
遠方で現在起こっていることを観測することはできません。その一方で，遠方の天体に着目することにより，過去に起こったことを観測することができるのです。

問題(2)　次の図は，距離指数と赤方偏移との関係を表しています。黒丸は観測結果を示しており，破線はハッブル定数を 70km/s/Mpc としたときの理論的な関係を示したものです。この図について述べた下の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。



問題(1)と同様に，縦軸は後退速度の指標と考えることができる。遠方の銀河の後退速度は，ハッブル・ルメートルの法則で予想されるよりも（大きい / 小さい）。つまり，この図の範囲において宇宙の膨張は（加速 / 減速）してきたと推定される。

問題(3)　次の図は，現在までの宇宙の大きさの変化を表したものです。この図について述べた下の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。



宇宙の膨張は（120 ~ 110 / 70 ~ 60）億年前まで（加速 / 減速），それから現在までの間は（加速 / 減速）してきた。このうち加速を担うものを（ダークマター / ダークエネルギー）と呼ぶが，現在のところその正体は知られていない。

復習

距離指数 $m - M$：
天体の見かけの等級 m から絶対等級 M を引いたもので，距離 d〔パーセク〕と

$$m - M = 5\log_{10}\frac{d}{10}$$

の関係がある。
　つまり，d が 10 倍になるごとに $m - M$ が 5 大きくなる。

ここがPOINT

問題(1)の図は赤方偏移が 0.08 までだったので，**問題**(2)の図の中では左下の一部分にあたります。
　近くは「最近」，遠くは「昔」に対応することに注意しましょう。

知っておこう

宇宙の膨張を減速させるものとしては，物質どうしの万有引力が挙げられます。

第21講 PART7 確認問題

問1 次の文章を読み，下の問いに答えよ。

宇宙のビッグバンモデルは，宇宙は約（ ア ）億年前に超高温・超高密度の点のような状態から始まり，膨張により現在のような姿になったとする考え方である。ビッグバンから（ イ ）万年後，宇宙の温度が約3000 Kまで下がり，（ ウ ）が起こった。このときの電磁波が宇宙膨張によって引き延ばされたものが，a<u>3 K宇宙背景放射</u>として観測されている。

宇宙膨張は加速しており，そのエネルギー源はダークエネルギーと呼ばれる未知のものである。宇宙には，通常の物質が（ エ ）%，ダークマターが（ オ ）%，ダークエネルギーが（ カ ）%存在すると考えられている。

(1) 空欄アに入る数として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① 46　② 92　③ 138　④ 184

(2) 空欄イ，ウに入る数と語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① イ：38　ウ：宇宙のインフレーション
② イ：38　ウ：宇宙の晴れ上がり
③ イ：380　ウ：宇宙のインフレーション
④ イ：380　ウ：宇宙の晴れ上がり

⑶ 下線部ａについて，３Ｋ宇宙背景放射の特徴として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① あらゆる方向から同じ強さで観測される。

② あらゆる方向から観測されるが，強さは方向による。

③ 特定の方向から一定の強さで観測される。

④ 特定の方向から観測されるが，強さは一定でない。

⑷ 空欄エ～カに入る数の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①	エ：68	オ：27	カ：5
②	エ：27	オ：5	カ：68
③	エ：5	オ：27	カ：68
④	エ：27	オ：68	カ：5

第 22 講　地学のための基礎知識

PART1 地学のための数学

目標　常用対数とは何かを理解し，正しく計算できる。

Chapter1　常用対数

　地震のマグニチュードや天体の等級など，地学には対数がしばしば用いられます。ここでは，常用対数について学びましょう。

常用対数の考え方

・10 進法で表した桁数

（例）

$100 = 10^2$　……1 の後ろに 0 が 2 つ　→ 3 桁

$10000 = 10^4$　……1 の後ろに 0 が 4 つ　→ 5 桁

→ 10 の何乗かがわかれば，数のおよその大きさがわかる。

・常用対数

$a = 10^b$ が成り立つとき $\log_{10} a = b$ と表す。

また，$\log_{10} a$ を a の**常用対数**という。

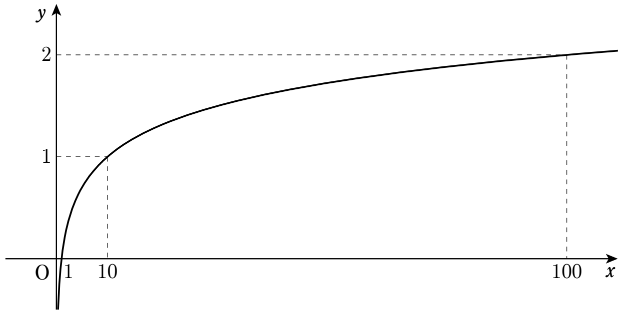
（例）

$100 = 10^2$ ……$\log_{10} 100 = 2$　→ 100 は 10 の 2 乗

$10000 = 10^4$ ……$\log_{10} 10000 = 4$ → 10000 は 10 の 4 乗

→ $\log_{10} a$ は，a が 10 の何乗かを表している。

・$y = \log_{10} x$ のグラフ



→ $\log_{10} x$ の値は，x が 10 倍になるごとに 1 だけ増える。

知っておこう

常用対数については数学 II で学習します。

対数の計算

・対数の和と差

$$\log_{10} A + \log_{10} B = \log_{10} AB$$

$$\log_{10} A - \log_{10} B = \log_{10} \frac{A}{B}$$

（例）

$$\begin{aligned}\log_{10} 10000 + \log_{10} 100 &= \log_{10} 10^4 + \log_{10} 10^2 \\ &= 4 + 2 = 6 \\ \log_{10} (10000 \times 100) &= \log_{10} (10^4 \times 10^2) \\ &= \log_{10} 10^{4+2} = \log_{10} 10^6 \\ &= 6\end{aligned}$$

よって，確かに

$$\log_{10} 10000 + \log_{10} 100 = \log_{10} (10000 \times 100)$$

・対数の実数倍

$$n \log_{10} A = \log_{10} A^n$$

（例）

$$\begin{aligned}3 \log_{10} 100 &= \log_{10} 100 + \log_{10} 100 + \log_{10} 100 \\ &= \log_{10} (100 \times 100 \times 100) \\ &= \log_{10} 100^3\end{aligned}$$

・底の変換

$$\log_c A = \frac{\log_{10} A}{\log_{10} c}$$

（例）

$$\begin{aligned}\log_{100} 1000000 &= 3 \\ \frac{\log_{10} 1000000}{\log_{10} 100} &= \frac{6}{2} \\ &= 3\end{aligned}$$

よって，確かに

$$\log_{100} 1000000 = \frac{\log_{10} 1000000}{\log_{10} 100}$$

まとめ

・$a = 10^b$ が成り立つとき $b =$ ＿＿＿＿＿と表し，これを a の＿＿＿＿＿という。

・$\log_{10} x$ の値は，x が＿＿倍になるごとに 1 だけ増える。

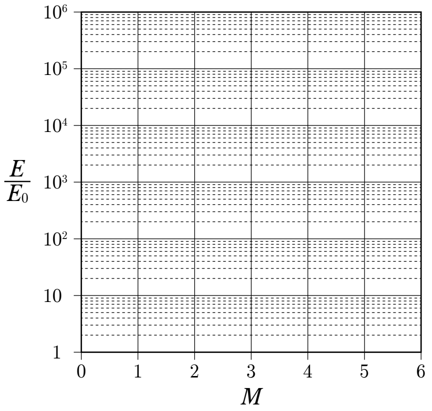
・$\log_{10} A + \log_{10} B =$ ＿＿＿＿＿が成り立つ。

・$\log_{10} A^n =$ ＿＿＿＿＿が成り立つ。

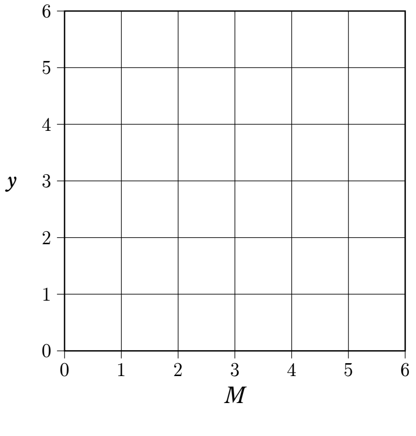
Chapter2　演習問題

ここでは，地震のマグニチュードを例として，常用対数の計算について確認しましょう。ただし，$\log_{10} 2 = 0.3$ とします。

問題(1)　地震のマグニチュード M とエネルギー E との間には，M が 2 大きくなるごとに E は 1000 倍になるという関係があります。この関係を，次の図中に描きましょう。ただし，ここではマグニチュード 0 の地震のエネルギーを E_0 とします。



問題(2)　問題(1)のグラフは，$y = \log_{10} \dfrac{E}{E_0}$ と置き換えたときどのように表されるでしょうか。横軸を M，縦軸を y とした次の図中に描きましょう。



問題⑶　**問題⑵**の結果を参考にして，$\log_{10}\dfrac{E}{E_0}$ を M の式で表しましょう。

問題⑷　**問題⑶**の結果をもとに，E を E_0 と M の式で表しましょう。

問題⑸　マグニチュードの差とエネルギーの比との関係に関する次の文章中の空欄［　**ア**　］・［　**イ**　］に入る式と，空欄［　**ウ**　］～［　**キ**　］に入る数値を答えましょう。ただし，［　**エ**　］・［　**オ**　］は整数で答えましょう。

　平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震（以下，地震A）の最大震度は7であった。その前に最大震度7が記録されたのは，平成16年（2004年）新潟県中越地震（以下，地震B）である。これらの地震のエネルギーの違いについて考えよう。

　地震A，地震Bのマグニチュードを M_A，M_B とする。また，地震A，地震Bのエネルギーを E_A，E_B とする。このとき，**問題⑶**の結果より

$$\log_{10}\frac{E_A}{E_0} - \log_{10}\frac{E_B}{E_0} = [\ \textbf{ア}\ ]$$

すなわち

$$\log_{10}\frac{E_A}{E_B} = [\ \textbf{イ}\ ]$$

である。

$M_A = 9.0$，$M_B = 6.8$ とすると，

$$\log_{10}\frac{E_A}{E_B} = [\ \textbf{ウ}\ ]$$

$$= [\ \textbf{エ}\ ] + \log_{10}[\ \textbf{オ}\ ]$$

$$= \log_{10}[\ \textbf{カ}\ ]$$

であり，

$$\frac{E_A}{E_B} = [\ \textbf{キ}\ ]$$

と求められる。

第 22 講 PART1 確認問題

問 1 次の問いに答えよ。

(1) $\log_{10}100000$ の値として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① -6 ② -5 ③ 5 ④ 6

(2) $\log_{10}20+\log_{10}50$ の値として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① 3 ② 10 ③ 300 ④ 1000

(3) $\log_{2}10$ を常用対数を用いて表したものとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① $\log_{10}\frac{1}{2}$ ② $\log_{10}2$ ③ $\log_{10}20$ ④ $\frac{1}{\log_{10}2}$

問 2 次の文章を読み，下の問いに答えよ。

恒星の絶対等級を M，見かけの等級を m，地球から恒星までの距離を d〔パーセク〕とすると，次の式が成り立つ。

$$M=m+5-5\log_{10}d$$

(1) ある恒星は見かけの等級が 1.5 等級で，地球からの距離は 30 パーセクである。この恒星の絶対等級として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。ただし，$\log_{10}3=0.48$ とする。

① -17.5 ② -0.9 ③ 4.1 ④ 13.9

⑵　ある恒星の絶対等級は－3.0 等級で，見かけの等級は 2.0 等級である。地球からこの恒星までの距離として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　5 パーセク　　②　50 パーセク

③　100 パーセク　　④　1000 パーセク

PART2 地学のための物理

目標 単振り子の周期と重力加速度との関係について説明できる。

Chapter1　単振動と振り子の等時性

重力加速度の測定は，地球の形や内部構造の推定において重要な役割を果たしてきました。ここでは，重力加速度の測定に利用された単振り子の性質について学びましょう。

単振動の力と周期

・単振動

ばねにおもりをつるして静止した状態から少し下に引き，手を離すと，おもりは一定の周期で上下運動する。このとき，静止した位置からの変位を x，時刻を t とすると，定数 A, ω を用いて

$$x = A\sin\omega t$$

と表せる。このような運動を**単振動**といい，A を振幅，ω を角振動数という。

知っておこう

単振動については物理で学習します。

・単振動の復元力と周期

単振動は，物体を振動の中心に戻そうとする力がはたらくことで起こる。この力を**復元力**という。

単振動の復元力 F は振動の中心からの変位 x に比例し，正の定数 k を用いて

$$F = -kx \quad \cdots\cdots ①$$

と表せる。

知っておこう

①式の右辺に「－」がついているのは，振動の中心から見た変位の向きと，復元力のはたらく向きが逆向きになるからです。

また，このときの単振動の周期 T は

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \quad \cdots\cdots ②$$

と表せる（ただし，m は物体の質量）。

振り子の等時性

・単振り子

重さを無視できる軽い糸に小球をつるし，鉛直方向の平面内で振らせたものを単振り子という。

・単振り子の復元力と周期

単振り子の復元力 F は，おもりにはたらく重力の接線方向の成分である。よって，糸が鉛直方向となす角を θ とすると

$$F = -mg\sin\theta \quad \cdots\cdots③$$

と表せる（ただし，m はおもりの質量）。θ が小さいとき，$\sin\theta$ は振り子の長さ l と弧に沿った変位 x を用いて

$$\sin\theta = \frac{x}{l}$$

と近似できるので，③式は

$$F = -\frac{mg}{l}x \quad \cdots\cdots④$$

となる。

さらに，①式と④式より

$$k = \frac{mg}{l}$$

と考えてよいので，②式は

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{\frac{mg}{l}}}$$

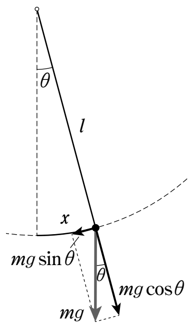
$$= 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \quad \cdots\cdots⑤$$

と表せる。

⑤式は単振り子の周期がおもりの質量や振り子の振幅によらず一定であることを表しており，このことを**振り子の等時性**という。

知っておこう

左の内容は，次の図を参考にすると少しわかりやすくなるでしょう。



知っておこう

単振り子の周期を求める過程で「θが小さい」と仮定しているため，⑤式は振幅が小さいときにのみ成り立ちます。

まとめ

- 重さを無視できる軽い糸に小球をつるし，鉛直方向の平面内で振らせたものを単振り子という。
- 重力加速度が g のとき，長さ l の単振り子の周期は，おもりの質量や振り子の振幅によらず________と表せる。

Chapter2　演習問題

ここでは，振り子の周期の測定例をもとにして，重力加速度を推定してみましょう。

問題(1)　単振り子の周期と重力加速度に関する次の文章中の空欄［　**ア**　］・［　**イ**　］に入る式を答えましょう。

単振り子の長さを l，重力加速度を g，周期を T とすると

$$T = [\ \ ア\ \ ]$$

が成り立つので，

$$L = [\ \ イ\ \ ]\ T^2$$

と表せる。

すなわち，横軸を T^2，縦軸を L とすると，グラフは原点を通る直線になり，その傾きから重力加速度 g の値を求められる。

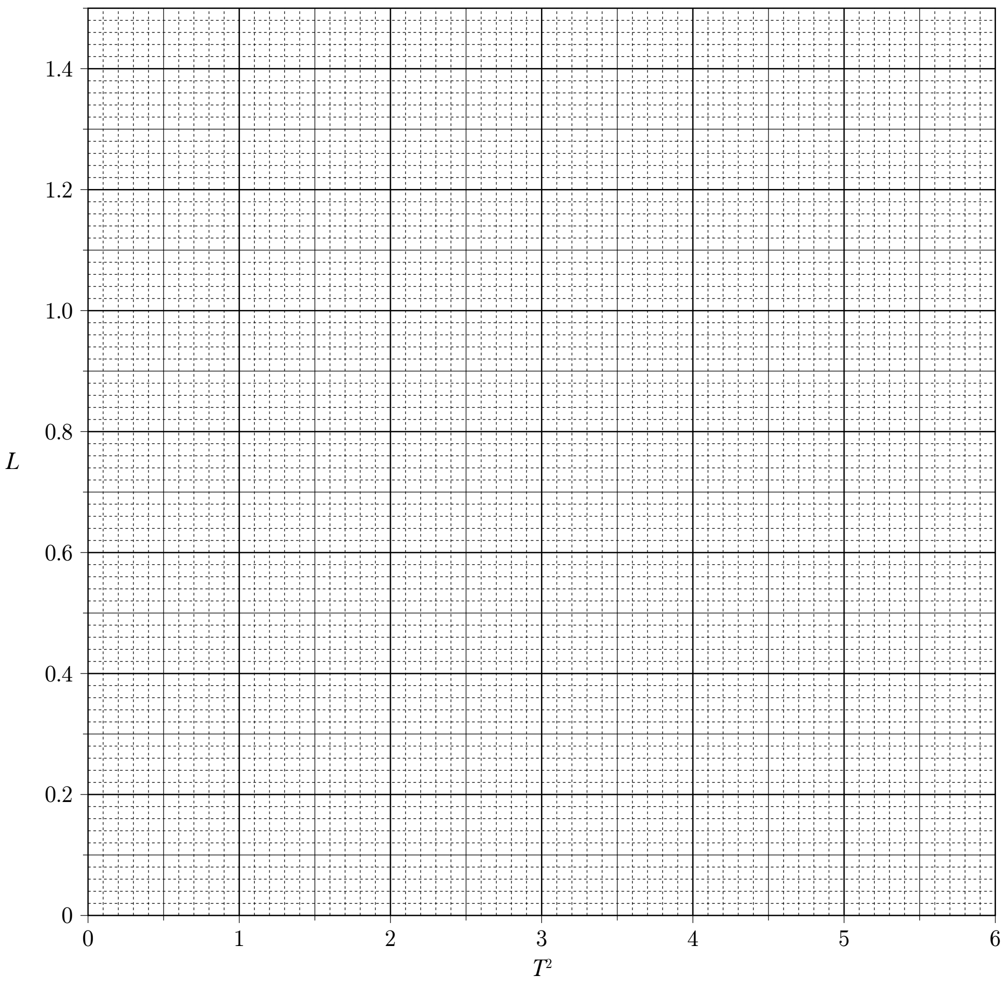
問題(2)　次の表は，ある地点で測定された，単振り子の長さと100周期の時間との関係です。この表の空欄を埋め，横軸を T^2，縦軸を L とした図中に，測定結果を●で描きましょう。また，原点を通り，測定結果を最もよく説明するような直線を描き，その傾きを小数第3位までの概数で答えましょう。

振り子の長さ〔cm〕	100周期の時間〔s〕	周期 T〔s〕	T^2〔s^2〕	長さ L〔m〕
60.9	156.70			
90.6	190.97			
117.6	217.50			
148.2	244.43			

知っておこう

単振り子の1周期の時間は短く，直接測定すると測定値に対する誤差の割合が大きくなってしまいます。そのため，左のように多数の周期の合計時間を測定し，測定値に対する誤差の割合を小さくするのです。

ただし，今回の**問題**(2)では測定値をグラフに描くことが目標なので，T^2 を計算するときにはグラフに描けないほど小さな位まで値を求める必要はありません。



問題⑶　**問題⑴**と**問題⑵**の結果をもとに重力加速度を求め，上から 3 桁の概数で答えましょう。ただし，円周率は 3.14 とします。

第22講　PART2　確認問題

問 1　次の問いに答えよ。

(1)　物体が単振動をしている。振動の中心（つり合いの位置）からの変位を x，時刻を t とするとき，この単振動を表す式はどれか。最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。ただし，A，ωは定数とする。

①　$x = \omega t + A$　　②　$x = \dfrac{A}{\omega t}$

③　$x = A\sin\omega t$　　④　$x = A\log_{10}\omega t$

(2)　質量 m の物体が，変位 x に対して復元力 $-kx$ (k は正の定数) を受けて単振動をしている。このとき，$2\pi\sqrt{\dfrac{m}{k}}$ は何を表すか。最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　周期　　②　速度　　③　加速度　　④　振幅

(3)　単振り子の振れが小さいとき，周期は何によって決まるか。最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　おもりの質量　　②　おもりの形

③　振り子の振幅　　④　振り子の長さ

＜ Note ＞

PART3 地学のための化学

目標　イオン結晶が安定に存在する条件について，陽イオンと陰イオンの半径の比に着目して説明できる。

Chapter1　結晶の安定性

　地学では，岩石を構成する鉱物の結晶の性質について学びます。ここでは，結晶の安定性について学びましょう。

イオン結晶

・**原子とイオン**

原子……原子のまわりを陽子と同じ数の電子が回り，電気的に中性であるもの。

イオン…原子のまわりを陽子と異なる数の電子が回り，電気的に中性でないもの。電子を（得て ／ 失って）＋の電荷をもっているものを**陽イオン**，（得て ／ 失って）－の電荷をもっているものを**陰イオン**という。

・**イオン結晶**

　イオンどうしが電気的な力で結びついてできる結晶を**イオン結晶**という。

　イオン結晶では，陽イオンと陰イオンの電荷の総和が０となり，結晶全体で見たときには電気的に中性となっている。

・**単位格子**

　結晶は３次元的な構造のくり返しからなる。そのくり返しの最小単位を**単位格子**という。

知っておこう
イオン結晶の基本については化学基礎，結晶構造については化学で学習します。

知っておこう
原子核にある陽子は＋，電子は－の電荷をもち，これらの数が等しければ全体でみたときに電荷の和が０になります。これを電気的に中性であるといいます。

・イオン結晶の安定性

イオン結晶は，

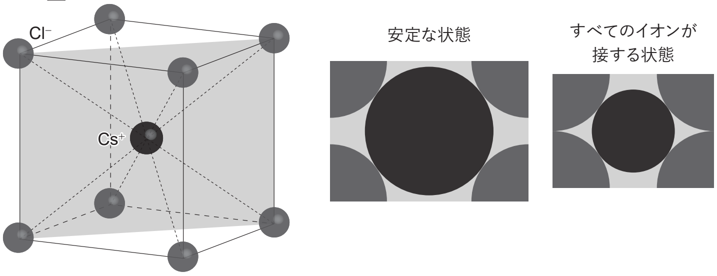
・1つの陽イオンはできるだけ多くの陰イオンと接触する

・陽イオンどうし，陰イオンどうしは接触しない

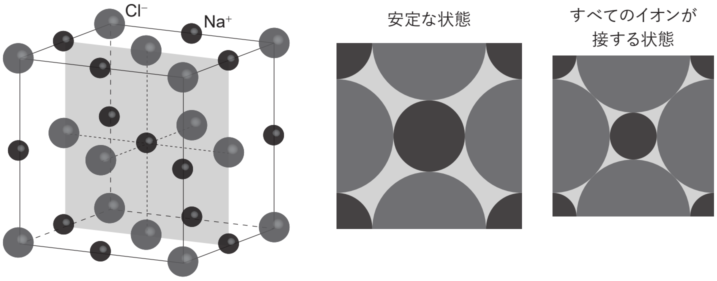
状態が安定である。

陰イオンどうしが接触しないためには，陰イオンに対して陽イオンがある程度以上大きい必要がある。

CsCl 型



NaCl 型



知っておこう

CsCl 型では1つの陽イオンのまわりに8つの陰イオンがあり，NaCl 型では1つの陽イオンのまわりに6つの陰イオンがあります。「1つの陽イオンはできるだけ多くの陰イオンと接触する」という意味ではCsCl 型の方が有利ですが，陽イオンの半径が小さい場合にはCsCl 型だと陽イオンが陰イオンと接触できなくなってしまうため，NaCl 型の方が安定となるのです。

→陽イオンと陰イオンの半径の比によって，安定な結晶構造が異なる。

知っておこう

電荷が同じで半径がほぼ同じイオンであれば，結晶構造を変えることなく元の結晶のイオンを置き換えることが可能です。結晶構造が同じで化学組成の異なる鉱物である固溶体は，このようなイオンの置き換えによって生じます。

まとめ

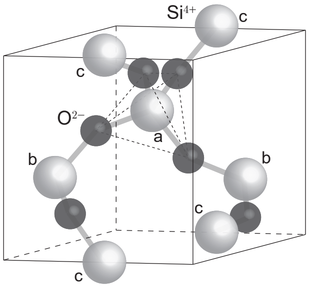
- イオンどうしが電気的な力で結びついてできる結晶をイオン結晶という。
- イオン結晶では陰イオンどうしが接触しない状態が安定であり，陰イオンに対して陽イオンがある程度以上________必要がある。
- イオン結晶では，陽イオンと陰イオンの半径の比によって，安定な結晶構造が異なる。

Chapter2　演習問題

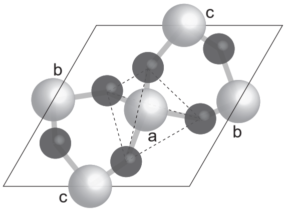
ここでは，化学組成が SiO_2 の鉱物を例にして，結晶構造と密度との関係について確認しましょう。

問題(1)　次の図は，石英の結晶の単位格子を示したものです。この図について述べた下の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

見取図



真上から見た図



石英の結晶の単位格子は，底面がひし形の四角柱である。見取図に示された 7 個の Si^{4+} に着目すると，**a** の Si^{4+} は全体，**b** の Si^{4+} は（半分 / 4 分の 1），**c** の Si^{4+} は（半分 / 4 分の 1）が単位格子の内部にある。よって，単位格子の内部にある Si^{4+} は（2 / 3 / 4）個分だといえる。6 個の O^{2-} はすべて単位格子の内部にあることに注意すると，1 つの単位格子は，（2 つ / 3 つ）の SiO_2 で構成されていることがわかる。

知っておこう

高校化学において，SiO_2 の Si と O との結合は共有結合として扱われることが多いようです。しかし，Si と O は電子を引き付ける力（電気陰性度）の差が大きいため，Si と O との結合はイオン結合の性質ももっています。

ここでは簡単のため，講義で扱った NaCl などと同様に，SiO_2 をイオン結晶として扱います。

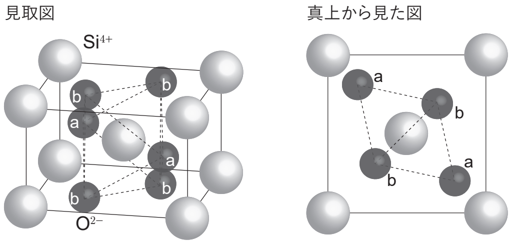
問題(2)　石英の結晶の単位格子について，底面は 1 辺の長さが 0.49nm で 1 つの内角が 60°のひし形，高さは 0.54nm とします。このとき，体積は何 nm^3 でしょうか。上から 2 桁の概数で求めましょう。ただし，$\sqrt{3} = 1.7$ とします。

知っておこう

1nm = 10^{-9}m です。

体積の単位として nm^3 は見慣れないかもしれませんが，長さの単位を cm としたときの体積が cm^3 になるのと同じことだと考えればよいでしょう。

問題(3)　次の図は，スティショバイトと呼ばれる鉱物の結晶の単位格子を示したものです。この図について述べた下の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。



スティショバイトの結晶の単位格子は，底面が正方形の直方体である。見取図に示された Si^{4+} に着目すると，中央の Si^{4+} は全体，他の Si^{4+} は（半分 / 4分の1 / 8分の1）が単位格子の内部にある。よって，単位格子の内部にある Si^{4+} は（2 / 3 / 4）個分だといえる。また，見取図に示された O^{2-} に着目すると，**a** の O^{2-} は全体，**b** の O^{2-} は半分が単位格子の内部にある。よって，単位格子の内部にある O^{2-} は（2 / 3 / 4）個分だといえる。以上より，1つの単位格子は，（2つ / 3つ）の SiO_2 で構成されていることがわかる。

問題(4)　スティショバイトの結晶の単位格子について，底面は1辺の長さが0.42nmの正方形，高さは0.27nmとします。このとき，体積は何 nm^3 でしょうか。上から2桁の概数で求めましょう。

問題(5)　**問題(1)〜問題(4)**の結果より，スティショバイトの密度は石英の密度の何倍でしょうか。上から2桁の概数で求めましょう。

知っておこう

スティショバイトは石英の多形，すなわち化学組成が同じで結晶構造の異なる鉱物であり，下部マントルに存在すると考えられています。また，小天体の衝突に伴い，地表でもごくまれに形成されます。

講義で扱ったような陽イオンと陰イオンの半径の比だけを考えると，化学組成が同じであれば結晶構造も1つに決まってしまうように思われるかもしれません。しかし，結晶のおかれる温度・圧力条件が異なれば，安定な結晶構造も異なるのです。

ここがPOINT

密度は単位体積あたりの質量ですが，本問では質量が与えられていません。

ここでは，$1nm^3$ あたりの SiO_2 の個数に着目するとよいでしょう。

第22講　PART3　確認問題

問 1　次の文章を読み，下の問いに答えよ。

原子では，陽子と（　ア　）の数が同じで，電気的に中性である。イオンでは，陽子と（　ア　）の数が異なり，（　ア　）の方が少ないものを（　イ　），多いものを（　ウ　）という。

イオンどうしが電気的な力で結びついてできる結晶を a イオン結晶という。イオン結晶の安定な結晶構造は，陽イオンと陰イオンの（　エ　）の比によって決まる。

(1)　空欄ア～ウに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① ア：電子　イ：陽イオン　ウ：陰イオン
② ア：電子　イ：陰イオン　ウ：陽イオン
③ ア：中性子　イ：陽イオン　ウ：陰イオン
④ ア：中性子　イ：陰イオン　ウ：陽イオン

(2)　下線部 a について，イオン結晶が安定な状態として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① 陽イオンどうしが接触する。
② 陰イオンどうしが接触する。
③ 1 つの陽イオンができるだけ多くの陰イオンと接触している。
④ どのイオンも接触しない。

(3)　空欄エに入る語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① 質量　② 半径　③ 電荷　④ 電子の数

< Note >

PART4 地学のための地理

目標　地形図の等高線から尾根地形と谷地形を読み取ることができる。

Chapter1　地形図の読み取り

地学で扱う地質図は，地形図の上に地質の情報を描いたものです。そのため，地形図から地形を想像できることは，地質図の理解のためにも重要なことです。ここでは，地形図の読み取りについて学びましょう。

知っておこう
地形図については地理総合で学習します。
地理総合では地図記号についても扱いますが，ここでは地形の読み方のみに着目します。

地形図

・**地形図とは**

さまざまな地表面の情報を決まった方法〔図式〕にしたがって表現した地図を地形図という。地形図において，標高は等高線によって表される。

知っておこう
地形図の読み方は，天気図にも通じます。地形図は地表面の高さ，地上天気図は海面気圧の高さ，等圧面天気図は等圧面の高度の分布を，それぞれ地図の上に示したものだからです。

・**地形図の縮尺**

地形図では，実際の距離が一定の割合に短くなるように描かれている。地図上の距離が実際の距離の a 分の 1 となるとき，その図の**縮尺**は「a 分の 1」であるという。この縮尺の値が大きいものを大縮尺，小さいものを小縮尺という。

日本では，国土地理院によって 5 万分の 1，2 万 5 千分の 1 などの縮尺の地形図が作成・発行されている。また，地方自治体などによって 5000 分の 1 や 2500 分の 1 などの（大縮尺 / 小縮尺）の地形図が作成されていることもある。

・**地形図の等高線**

等高線は，標高が一定である点を結んだ曲線である。

国土地理院の発行する縮尺 2 万 5 千分の 1 の地形図の場合，10m ごとに等高線が引かれており，これを主曲線という。また，50m ごとに太い等高線が引かれており，これを計曲線という。

知っておこう
地学の問題で扱われる地形図の場合，すべての等高線が同じように描かれていることもあります。

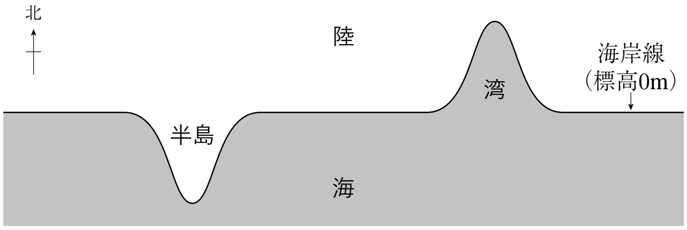
・地形図から読む尾根と谷

東西にのびる海岸に小さな半島と湾があるときについて考える。海岸線は標高 0m の等高線とみなすことができて，

・等高線が海側に凸になっている部分は（半島 / 湾）

・等高線が陸側に凸になっている部分は（半島 / 湾）

に対応することがわかる。

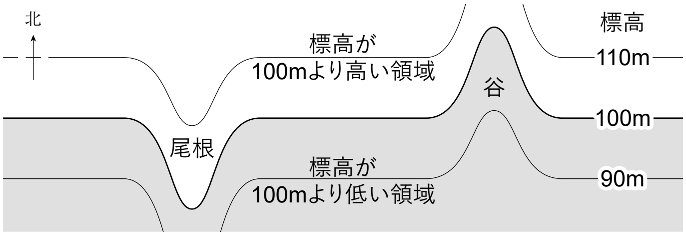


陸地において，周囲より標高の高い部分の連なりを**尾根**，低い部分の連なりを**谷**という。海岸の場合と同様に考えて，

・等高線が標高の低い側に凸になっている部分は(尾根 / 谷)

・等高線が標高の高い側に凸になっている部分は(尾根 / 谷)

に対応することがわかる。



知っておこう

左の図は，上の図の地形の標高を 100m 高くしたようなものだと考えることができます。

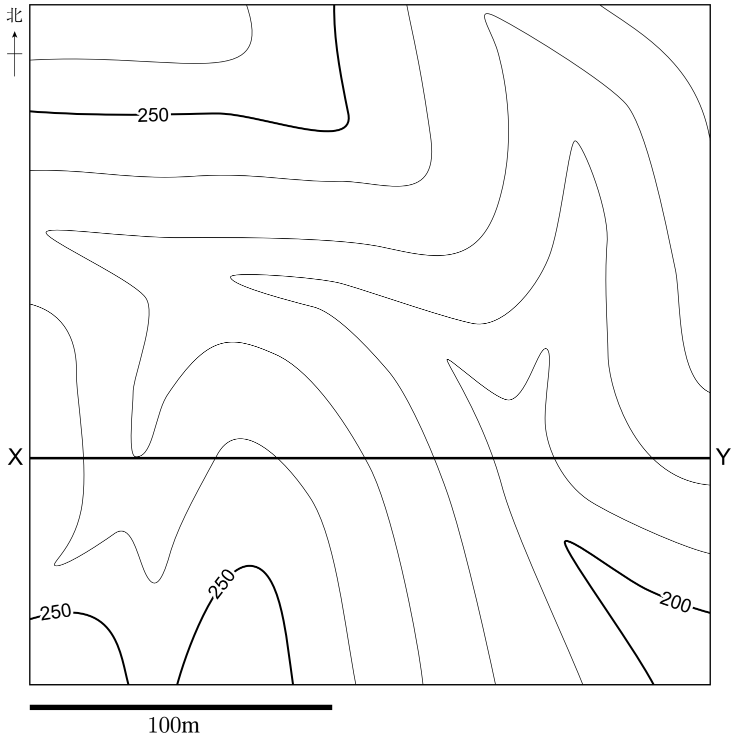
まとめ

・地形図において，地表の標高は等高線によって表される。

・尾根と谷のうち，等高線が標高の低い側に凸になっている部分は＿＿＿であり，標高の高い側に凸になっている部分は＿＿＿である。

Chapter2　演習問題

次の図は，ある地域の模式的な地形図です。ここでは，この図を例にして地形の起伏の読み取り方を確認しましょう。



問題(1)　上の地形図について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

この地形図は，実際の距離 100m が 4cm になるように描かれている。よって，この図の縮尺は（250 / 400 / 2500 / 4000 / 25000 / 40000）分の 1 である。また，この地形図の計曲線は 50m 間隔で描かれており，主曲線の間隔は（5m / 10m）であることがわかる。

問題⑵　地形図中の X − Y に沿った地形断面図を，地形図の下に描いてください。

問題⑶　この地域では，すべての谷が水の流れる沢となっているものとします。**問題⑵**の結果を参考にして，地形図中に確認できる沢をすべて実線で描いてください。

問題⑷　**問題⑵**・**問題⑶**の結果を参考にして，地形図中でおよそ 100m 以上にわたって連続的に追跡できる 2 本の尾根を破線で描いてください。

知っておこう

地形図から地形の起伏を直接読み取ることが難しいと感じるときは，今回の**問題⑵**のように，地形断面図を描いてみるとよいでしょう。

　地形断面図はどこでどのような向きに描いてもよいのですが，本問の X − Y のように多くの等高線を横切るように描くと，地形の起伏について得られる情報量が多くなります。

第22講 PART4　確認問題

問 1　次の問いに答えよ。

(1)　地形図において等高線は何を表すか。最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　距離　　②　温度　　③　気圧　　④　標高

(2)　国土地理院発行の縮尺２万５千分の１の地形図では，何 m ごとに等高線が引かれているか。最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

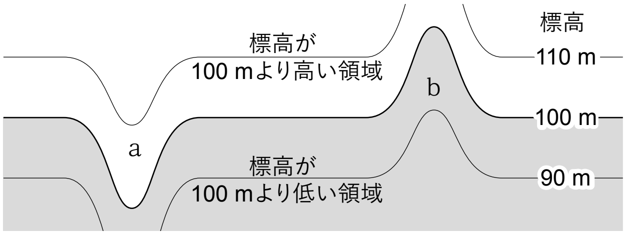
①　1 m　　②　5 m　　③　10 m　　④　50 m

(3)　縮尺が２万５千分の１の地形図では，地図上の 10 cm の距離は，実際には何 km の距離であるか。最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　0.25 km　　②　2.5 km　　③　25 km　　④　250 km

問 2　次の文章を読み，下の問いに答えよ。

地形図において，標高０m の等高線が海側に凸になっている部分は（　ア　），陸側に凸になっている部分は（　イ　）を表している。また，陸地において周囲より標高の高い部分の連なりを（　ウ　）といい，下の図では（　エ　）の部分に対応する。



⑴　空欄ア，イに入る語句の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① ア：半島　イ：湾
② ア：半島　イ：崖
③ ア：湾　イ：半島
④ ア：湾　イ：崖

⑵　空欄ウ，エに入る語句と記号の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① ウ：谷　エ：a
② ウ：谷　エ：b
③ ウ：尾根　エ：a
④ ウ：尾根　エ：b

テキスト解答

第12講　地球表層の熱収支

PART1　シュテファン・ボルツマンの法則

問題⑴　垂直，$4\pi r^2$，垂直

問題⑵　ア：$4\pi S_0 r^2$

問題⑶　イ：σT^4　ウ：$4\pi R^2$　エ：$4\pi\sigma R^2 T^4$

問題⑷　オ：$\sqrt[4]{\frac{S_0 r^2}{\sigma R^2}}$，6000K

PART2　ウィーンの変位則

問題⑴　X：紫外線　Y：可視光線　Z：赤外線

問題⑵　a

問題⑶　ア：288　イ：10　ウ：0.5　エ：6000

λ，反比例

PART3　地球の全球熱収支と温室効果

問題⑴　アルベド

問題⑵　赤外線，９割，赤外線

問題⑶　周囲からエネルギーを受け取る，周囲にエネルギーを放出する

問題⑷　x：50　y：60　z：100

PART4　地球の放射平衡温度

問題⑴　ア：$\pi S_0 R^2$　イ：$\pi S_0(1-A)R^2$

問題⑵　ウ：σT^4　エ：$4\pi\sigma R^2 T^4$

問題⑶　$\sqrt[4]{\frac{S_0(1-A)}{4\sigma}}$

問題⑷　255K，−18℃

第 13 講　大気の構造

PART1　大気の組成

問題⑴　４番目，0.04%，中間圏

問題⑵　吸収，北半球，北半球

問題⑶　b

PART2　断熱変化と大気の安定性

問題⑴　増加，大気を押しのける，減少

問題⑵　凝結，凝華，潜熱，水分子，空気塊，小さい，10

問題⑶　ア：6，条件付き不安定

問題⑷　a，b，c

PART3　雲と降水

問題⑴　15℃，低い，大きく，2km，高い，小さく

問題⑵　冷たい雨，−16℃，水蒸気の氷晶への凝華，
−18℃，過冷却水滴の水蒸気への蒸発，−16℃ ～ −18℃

PART4　フェーン現象

問題⑴　ア：45.5　イ：36.1

問題⑵　ウ：30.7

問題⑶　エ：24.5　オ：1.8

問題⑷　カ：500　キ：26.3　ク：22.5　ケ：37.2

第 14 講　大気の運動

PART1　地上天気図と等圧面天気図

問題(1)　【※図参照】

問題(2)　【※図参照】

問題(3)　大きく，背が低い，低い，低緯度側

PART2　空気塊にはたらく力

問題(1)　【※図参照】

問題(2)　【※図参照】

問題(3)　【※図参照】

問題(4)　【※図参照】

PART3　地衡風

問題(1)　低い，北向き，南向き，右向き，西から東，西風

問題(2)　半分，２倍，気圧傾度，比例，２倍

PART4　傾度風と地上風

問題(1)　ア：$\dfrac{v}{2r\Omega\sin\phi}$

問題(2)　イ：0.1，比例，反比例

問題(3)　【※図参照】

円運動の半径が大きく等圧線が直線に近いときや，風速が小さいとき

PART5　局地風

問題(1)　温まりやすい，高温，小さい，陸面，低温

問題(2)　大きい，大きい，低圧，高圧，高圧側から低圧側

問題(3)　南側，東西

PART6　季節風

問題(1)　低温，上昇，低気圧，下降，高気圧，北より，北より

問題(2)　高温，下降，高気圧，上昇，低気圧，南より，西より

問題(3)　熱帯収束帯，温帯低気圧，停滞前線

PART7　熱帯低気圧と台風

問題(1)　積乱雲，摩擦力，反時計回り

問題(2)　狭く，強い，17

問題(3)　南風，北風，南風，北風，反時計回り，
時計回り，高気圧，低気圧，高気圧，
15℃，高い，潜熱

PART8　偏西風波動と温帯低気圧

問題(1)　ア：$\frac{1}{2}Sh\rho_1$　イ：$\frac{1}{2}Sh\rho_2$　ウ：$\frac{1}{4}Sh^2g\rho_1$　エ：$\frac{1}{4}Sh^2g\rho_2$
オ：$\frac{1}{8}Sh^2g\rho_1$　カ：$\frac{3}{8}Sh^2g\rho_2$　キ：$\frac{1}{8}Sh^2g(\rho_1-\rho_2)$

問題(2)　低温側から高温側，寒気，高温側から低温側，暖気，
西側，東側，発達する

PART9　高気圧

問題(1)　亜熱帯高圧帯，ハドレー循環，放射冷却

問題(2)　3～5km，1～2km

第 15 講　海洋

PART1　海流

問題(1)　北向き，南向き，東向き，20 倍，20 倍，カリフォルニア海流，黒潮

問題(2)　反時計回り，時計回り，西から東，古第三紀

PART2　熱塩循環と海水の鉛直構造

問題(1)　【※図参照】

問題(2)　【※図参照】

問題(3)　高く，低く，多く，少ない，低い，小さい，低い，大きく

PART3　波

問題(1)　数 m～ 数百 m，小さい，表面波，長い，15 m，54km，2 日

問題(2)　数十 km～ 数百 km，大きい，長波，200 m，720km，1 日，遅く，高く

PART4　潮汐

問題(1)　ア：0.0339

問題(2)　イ：1.04　ウ：25.0　エ：12.5

問題(3)　大きく，新月と満月，小さく，上弦の月と下弦の月，大潮，1 週間

第 16 講　大気・海洋の変動

PART1　対流圏と成層圏の変動

問題(1)　低い，極向き，低く

問題(2)　高い，西部

問題(3)　低い，高い，ラニーニャ，エルニーニョ，強く，高く

PART2　大気による物質輸送

問題(1)　春，秋，春

問題(2)　大きい，低緯度，低緯度から高緯度

問題(3)　南極，南半球，塩素，春，低温

PART3　都市とその周辺の大気

問題(1)　2 ～ 3 倍，ヒートアイランド現象

問題(2)　安定，不安定，条件付き不安定，絶対安定，起こりにくい，逆転層の下部に留まりやすい

問題(3)　二酸化炭素，一酸化窒素や二酸化窒素，二酸化硫黄，季節風

PART4　物質循環

問題(1)　ア：7×10^{14}　イ：7×10^{13}　ウ：10

問題(2)　5 年，400 年

問題(3)　エ：60 万

問題(4)　長い，短い，終わって長い時間が経過してから

第 17 講　日本列島の今・昔

PART1　現在の日本近海の海洋環境

問題(1)　転向力，西，低く

問題(2)　小さい，高い，低く

問題(3)　反時計回り，中心から離れる，時計回り，反時計回り

PART2　現在の日本列島の気象

問題(1)　満潮，数 m，

問題(2)　ア：Mg　イ：$\frac{Mg}{S}$　ウ：10^4　エ：9.9×10^3　オ：10^2　カ：10

問題(3)　キ：10^2　ク：100mm

PART3　日本列島の地質

問題(1)　中央構造線，糸魚川―静岡構造線

問題(2)　石炭紀～ペルム紀，フズリナ，ペルム紀，
領家帯，高温低圧型，白亜紀，ケイ長質，
三波川帯，低温高圧型，白亜紀，
四万十帯，北帯，南帯

PART4　新生代の日本列島

問題(1)　背弧，反時計回り，時計回り，火山岩

問題(2)　引張，圧縮，逆断層

問題(3)　120m～130m，宗谷海峡と間宮海峡，対馬海流，低かった，北西，小さかった

第 18 講　惑星の運動と見え方

PART1　地球の自転と公転

問題(1)　ア：$\overrightarrow{v_X} - \overrightarrow{v_A}$　イ：$\overrightarrow{v_X} - \overrightarrow{v_B}$

同じ向き

問題(2)　ウ：$\frac{v}{c}$　エ：3600　オ：3.16×10^{-5}

問題(3)　カ：$\frac{vT}{2\pi}$　キ：$\frac{vT}{2\pi c}$　ク：3.15×10^{7}　ケ：8　コ：18

PART2　ケプラーの法則

問題(1)　焦点の 1 つ，1.2 倍

問題(2)　1.2 倍

問題(3)　ア：1　イ：$\sqrt[a]{a}$

長い，内側，外側

PART3　天球と太陽の動き

問題(1)　一致，反時計回り，西から東，赤道面上

問題(2)　【※図参照】

問題(3)　反時計回り，西から東，夏

問題(4)　【※図参照】

PART4　時刻と暦

問題(1)　進んでいる，近日点と遠日点，a，二至二分， b

ア：12　イ：0　ウ：15　エ：11　オ：45　カ：135　キ：20

遅れて

ク：11　ケ：25

問題(2)　コ：1460.9688　サ：365.25　シ：146096.8800　ス：97　セ：100

ソ：3　タ：100　チ：400　ツ：365.2422

PART5　惑星の視運動

問題(1)　0^{h}，2^{h}，$18^{h} \sim 20^{h}$，2022 年 10 月，内合，外合，19 か月

問題(2)　約 12^{h} 異なる，正反対の，2023 年 11 月，25 か月

問題(3)　ア：$\dfrac{1}{P_{A}}$　イ：$\dfrac{1}{P_{B}}$　ウ：$\dfrac{t}{P_{A}}$　エ：$\dfrac{t}{P_{B}}$　オ：1　カ：$\dfrac{1}{P_{A}} - \dfrac{1}{P_{B}}$

第 19 講　太陽系の天体

PART1　太陽の構造

問題⑴　ア：$\frac{R}{d}$　イ：$\frac{r}{d}$　ウ：$\frac{\theta}{p}$

問題⑵　110

問題⑶　1000 万 K，４つ，ヘリウム，核融合，放射，対流，可視光線

PART2　太陽の表層

問題⑴　110

ア：340　イ：0.94

大きい

問題⑵　40°

ウ：27

3°

エ：43°

オ：25

問題⑶　放射層，小さい

PART3　太陽活動の地球への影響

問題⑴　大気上端，長い，0.1%，1.04，1.08，小さい

問題⑵　正の相関をもつ，低い，小さい，小さく，白斑，高い

PART4　太陽系の惑星

問題⑴　地球型惑星，木星型惑星

問題⑵　A：水星　B：火星　C：土星　D：木星

問題⑶　0.1，$\frac{S}{r^2}$，0.1

問題⑷　X は金星であり，二酸化炭素を主成分とする厚い大気をもつため，その強い温室効果により表面温度が高くなっている。

PART5　太陽系のさまざまな天体

問題(1)　細長い，球状

問題(2)　太陽系外縁天体，真円に近い，同じような，小惑星，同じような，同じ

問題(3)　小さく，小さい

第 20 講　恒星

PART1　天体の等級

問題(1)　ア：$\frac{1}{100}$　イ：n　ウ：$\frac{m}{5}$

問題(2)　エ：2　オ：$\left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2$

問題(3)　カ：10　キ：$\frac{m-M}{5}$　ク：$\left(\frac{10}{d}\right)^2$　ケ：5　コ：5

PART2　恒星のスペクトル型

問題(1)　絶対温度，反比例，ウィーンの変位則，高く，低い，大気，Hα線，
水素原子，高い

問題(2)　フラウンホーファー線

問題(3)　G 型

PART3　HR 図

問題(1)　ア：σT^4　イ：$4\pi R^2$　ウ：$4\pi\sigma T^4 R^2$　エ：$4\pi\sigma T_S^4 R_S^2$　オ：4　カ：2

問題(2)　【※図参照】

問題(3)　大きい，M 型，0.01 倍，大きい

PART4　主系列星の質量と寿命

問題(1)　比例，反比例
ア：M　イ：L　ウ：M_S　エ：L_S　オ：$\frac{M}{M_S}$　カ：$\frac{L}{L_S}$

問題(2)　キ：4

問題(3)　100，10000，10，1000 万，10，3000 億

PART5　太陽質量の恒星の一生

問題(1)　ア：4　イ：2　ウ：2　エ：4　オ：3　カ：7

問題(2)　キ：−3　ク：10

PART6　さまざまな恒星の一生

問題(1)　ア：$\frac{1}{16}$　イ：10000　ウ：160000　エ：400
2
オ：$\frac{1}{100}$
地球と同程度

問題(2)　100 万分の 1，1.4，10^6

問題(3)　60000，1.4，5×10^{14}

PART7　星団

問題(1)　暗く，低い，大きく，短い，大きな，種族Ⅱ，星団 X

問題(2)　散開星団，散光星雲，球状星団，星団 Y，星団 X

PART8　連星

問題(1)　15

問題(2)　第 3 法則，2.0
ア：3.2　イ：1.4　ウ：0.6

第 21 講　銀河と宇宙

PART1　銀河系の構造

問題(1)　円盤部，バルジ，星間物質

問題(2)　球状星団，3 万光年，7.5 万光年

問題(3)　電波，電波や赤外線，X 線

PART2　銀河系の天体の運動

問題(1)　$\frac{1}{8000}$ 秒角，1.0×10^{10}，2 億年

問題(2)　ア：$\frac{2\pi a}{P}$　イ：$\frac{av^2}{4\pi^2}$
a，比例

PART3　さまざまな銀河

問題(1)　−22，クェーサー

問題(2)　棒渦巻き銀河，紫外線，赤外線，セイファート銀河

問題(3)　楕円銀河，電波銀河

PART4　宇宙の距離はしご

問題(1)　ア：500　イ：−4.5　ウ：400　エ：−7.5

問題(2)　【※図参照】

問題(3)　オ：10^7

問題(4)　カ：10^9

PART5　宇宙の階層構造

問題(1)　30′
ア：120

問題(2)　8 分 20 秒
イ：60000

問題(3)　①：A　②：B　③：D　④：F　⑤：H　⑥：I　⑦：J

PART6　ハッブル・ルメートルの法則

問題⑴　70，1Mpc

問題⑵　ア：vt_{H}　イ：$\dfrac{1}{H_0}$　ウ：1×10^{10}

問題⑶　$1 + z$

PART7　宇宙の誕生と進化

問題⑴　ア：0.06　イ：8　ウ：0.94

問題⑵　小さい，加速

問題⑶　70 ~ 60，減速，加速，ダークエネルギー

第 22 講　地学のための基礎知識

PART1　地学のための数学

問題(1)　【※図参照】

問題(2)　【※図参照】

問題(3)　$\log_{10}\dfrac{E}{E_0}=\dfrac{3}{2}M$

問題(4)　$E=E_0 10^{\frac{3}{2}M}$

問題(5)　ア：$\dfrac{3}{2}(M_A-M_B)$　イ：$\dfrac{3}{2}(M_A-M_B)$　ウ：3.3　エ：3　オ：2

カ：2×10^3　キ：2×10^3

PART2　地学のための物理

問題(1)　ア：$2\pi\sqrt{\dfrac{L}{g}}$　イ：$\dfrac{g}{4\pi^2}$

問題(2)　【※図参照】

問題(3)　$9.78\mathrm{m/s^2}$

PART3　地学のための化学

問題(1)　半分，4 分の 1，3，3 つ

問題(2)　$0.11\mathrm{nm^3}$

問題(3)　8 分の 1，2，4，2 つ

問題(4)　$0.048\mathrm{nm^3}$

問題(5)　1.6

PART4　地学のための地理

問題(1)　2500，10m

問題(2)　【※図参照】

問題(3)　【※図参照】

問題(4)　【※図参照】

確認問題解答

第12講　PART1　確認問題　解答

問1

(1)　③

解説：

入射する電磁波を反射することなく，すべて吸収する物体を黒体という。ある環境に長い時間置かれて安定した黒体は，自身の温度に応じた電磁波を放射する。

(2)　④

解説：

黒体の単位表面積から単位時間に放射されるエネルギーは，黒体表面の絶対温度の 4 乗に比例する。

第12講　PART2　確認問題　解答

問1

（1）　④

解説：

人間の目で見える波長帯の電磁波を可視光線という。

（2）　①

解説：

さまざまな波長の電磁波が混ざり合ったものを波長ごとに分けることを分光といい，分けたものをスペクトルという。

問2

（1）　①

解説：

黒体表面の絶対温度と，放射エネルギーが最大となる波長は互いに反比例の関係にある。

（2）　②

解説：

黒体表面の絶対温度 T と，放射エネルギーが最大となる波長 λ は互いに反比例の関係にあるので，絶対温度 T が高いほど，波長 λ は短くなる。

第12講　PART3　確認問題　解答

問 1

(1)　④

解説：
地球の大気が吸収するエネルギーは，太陽放射から 20，潜熱・顕熱の 30，地表からの 110 を合わせて 160 である。

(2)　③

解説：
赤外線を吸収するのは水蒸気，二酸化炭素，メタン。紫外線を吸収するのはオゾン。

(3)　④

解説：
可視光線をよく通すが，赤外線を吸収する性質をもつ気体を温室効果ガスという。

(4)　③

解説：
地球の大気に含まれる温室効果ガスは多い順に水蒸気，二酸化炭素，メタンである。

第12講　PART4　確認問題　解答

問1

(1)　④

解説：
単位時間に地球に入射する太陽放射のエネルギーの総量は，地球が遮る太陽放射の総量に等しい。地球に入射した放射エネルギーの一部は反射され，その割合をアルベドという。

(2)　②

解説：
地球全体でのアルベドの平均値は約 0.3 である。

問2

(1)　④

解説：
地表面の平均温度は約 288 K である。

(2)　①

解説：
地球の放射平衡温度は，大気がない場合の地表面の温度に対応している。実際には大気があり，大気の温室効果によって，地表面の平均温度は放射平衡温度より高くなる。

第13講　PART1　確認問題　解答

問1

(1) ①

解説：
水蒸気は対流圏の下層に局在し，特に低緯度の大気に多く含まれる。

(2) ③

解説：
植物は光合成によって二酸化炭素を吸収する。光合成は夏に盛んになる。

第13講　PART2　確認問題　解答

問1

(1)　①

解説：
乾燥断熱減率は約 10K/km（100m の上昇につき約 1.0℃），湿潤断熱減率は約 5K/km（100m の上昇につき約 0.5℃）である。

問2

(1)　③

解説：
周囲の大気の気温減率が乾燥断熱減率より大きい場合，上昇した空気塊の温度低下より周囲の大気の温度低下の方が大きいので，空気塊の温度は周囲より高くなり，空気塊はさらに上昇しようとする。

(2)　②

解説：
周囲の大気の気温減率が湿潤断熱減率より大きく，乾燥断熱減率より小さい場合，飽和していない空気塊が上昇すると，周囲の大気より温度が低くなるので，元の高度に戻ろうとする（安定)。飽和した空気塊が上昇すると，周囲の大気より温度が高くなるので，さらに上昇を続ける（不安定)。

第13講　PART3　確認問題　解答

問1

(1)　②

解説：
水の凝固点は 0℃であるが，0℃より低い温度でも液体のままで存在することがある。この状態を過冷却という。

(2)　③

解説：
飽和水蒸気圧は，その温度の空気中に含むことができる水蒸気の限度量を圧力で表したものである。水蒸気圧が飽和水蒸気圧を上回っている状態のことを過飽和という。

問2

②

解説：
大気中のエーロゾルは，水蒸気が状態変化してできる水滴や氷晶の核となり，雲の中には，水滴と氷晶の一方または両方が含まれる。

問3

(1)　②

解説：
− 40℃を下回ると過冷却水滴が凝固しやすくなる。

(2)　④

解説：
水に対して不飽和なので，蒸発して水蒸気になる。また，氷に対して過飽和なので，その水蒸気は凝華して氷晶を成長させる。蒸発と凝華によって成長した氷晶が落下し，融けて生じた雨を冷たい雨という。

第13講　PART4　確認問題　解答

問1

(1)　④

解説：
水蒸気を含む空気塊が山を越えるとき，風上側での降水により水蒸気量が少なくなって風下側に吹き下ろす。この乾燥した高温の風をフェーンという。

(2)　③

解説：
図では，台風に吹き込む南東の風がフェーン現象を引き起こし，風下の日本海側の方が高温となっている。

問2

(1)　③

解説：
A→Bでは，空気塊は不飽和で，乾燥断熱減率に従う。B→Cは飽和で湿潤のため湿潤断熱減率に従って気温が低下し，雲が形成される。

(2)　②

解説：
降水で空気塊の水蒸気が減少することが，風下における乾燥の原因であり，潜熱が空気塊に供給されることが風下における高温の原因である。

第14講　PART1　確認問題　解答

問1

(1)　②

解説：
海面（標高０m）における気圧の分布を等圧線によって示した天気図を地上天気図という。また，上空における気圧の分布を等圧面の高度によって示した天気図を等圧面天気図という。

(2)　①

解説：
ある地点の上空では高度が低いほど気圧が高くなるので，周囲より等圧面の高度の低いところが低圧になっている。等圧面の等高度線が低緯度側に凸の部分が気圧の谷，高緯度側に凸の部分が気圧の尾根である。

第 14 講　PART2　確認問題　解答

問 1　②

解説：
気圧傾度力は気圧差による力，転向力は地球の自転によって生じる見かけの力，遠心力は円運動の中心と逆向きにはたらく見かけの力，摩擦力は風の流れが乱されることで生じる力である。

問 2

(1)　①

解説：
気圧傾度力の大きさは，気圧傾度に比例し，等圧線と直交する向きに高圧側から低圧側に向かってはたらく。

(2)　③

解説：
転向力の大きさは，水平面上での風速と緯度の正弦 (sin) との積に比例する。また，北半球では，転向力は空気塊の進行方向から直角右向きにはたらく。

(3)　④

解説：
遠心力は円運動の中心と逆向きにはたらき，その大きさは，風速の 2 乗に比例し，円運動の半径に反比例する。

(4)　①

解説：
摩擦力は進行方向と逆向きにはたらき，その大きさは風速に比例する。比例定数は海上より陸上の方が大きい。

第14講 PART3 確認問題 解答

問1

(1) ④

解説：
気圧傾度力と転向力がつり合っている状態で吹く風を地衡風という。気圧傾度力は等圧線に垂直に高圧側から低圧側の向きにはたらく。

(2) ①

解説：
北半球では，転向力は空気塊の進行方向に対して直角右向きにはたらくので，地衡風の向きはウである。地衡風の風速は気圧傾度の大きさに比例する。

第 14 講　PART4　確認問題　解答

問 1

(1)　①

解説：
気圧傾度力, 転向力, 遠心力の 3 つの力がつり合っている。
遠心力は円運動の中心と反対の向きにはたらく。

(2)　④

解説：
気圧傾度力，転向力，遠心力の 3 つの力がつり合っているような状態で吹く風を傾度風という。

問 2

(1)　②

解説：
気圧傾度力，転向力，摩擦力の 3 つの力がつり合っているような状態で吹く風を地上風という。

(2)　①

解説：
地上風は等圧線を高圧側から低圧側に横切って吹き，地上風が等圧線となす角は海上よりも陸上の方が大きい。

問 3　③

解説：
高気圧のまわりの地上付近の風は，等圧線を横切って外側へと吹き出し，中心付近の上空には下降気流が生じる。
低気圧のまわりの地上付近の風は，等圧線を横切って中心へと吹き込み，中心付近の上空には上昇気流が生じる。

第 14 講　PART5　確認問題　解答

問 1

(1)　④

解説：
非常に限られた範囲の風なので，局地風とよばれる。

(2)　④

解説：
山岳地域で吹く風は斜面を吹き上がるか，吹き下りるかであるため，山谷風とよぶ。

(3)　①

解説：
昼間は海にくらべて陸が温かくなるため，その上の大気が上昇して気圧が下がる。そのため，海から陸に向かって風が吹く。これを海風という。

(4)　②

解説：
昼間は大気にくらべて地表面（山）が温かくなるため，その上の大気が上昇して気圧が下がる。そのため，山の斜面に沿って上向きに風が吹く。これを谷風という。

(5)　②

解説：
昼間と夜間で風向が変化するので，周期は 1 日である。

第14講　PART6　確認問題　解答

問1

（1）③

解説：
熱容量とは，比熱に質量をかけたもので，熱容量が小さいということは温まりやすく，冷めやすいということである。海洋は熱容量が大きく，大陸は熱容量が小さいため，夏と冬で両者の温度の関係は逆転する。

（2）②

解説：
夏は温度の高い大陸の上で上昇気流が発生し，低気圧となる。そのため，海洋から風が吹き込んでくる。対して，冬はこの逆となり，大陸から海洋へ風が吹く。

（3）④

解説：
季節により大陸と海洋の温度の関係が変わって地球規模の気圧配置が変わり，大陸の縁では季節によって風向が変わる。この風を季節風という。

第 14 講　PART7　確認問題　解答

問 1

(1)　②

解説：
転向力がはたらくところでないと渦が発生しないため，緯度 5 度以上の海域で発生する。

(2)　④

解説：
水の潜熱の放出によって上昇気流が発達し，それが水の蒸発をさらに促進するという正のフィードバックがはたらく。

(3)　①

解説：
台風は最大風速が約 17m/s 以上のものをいう。

(4)　②

解説：
台風の等圧線は同心円状で，発達した台風の中心付近には台風の目があり，穏やかな下降気流が発生している。

第 14 講　PART8　確認問題　解答

問 1

(1)　①

解説：
偏西風は中緯度地域の対流圏全体を，1 年を通して吹いている西風である。

(2)　④

解説：
偏西風は極のまわりを，南北に蛇行しながら回っている。

(3)　④

解説：
南半球は大陸が少ないため，等圧面の等高度線が真円に近くなる。北半球では冬の方が等圧面の等高度線の間隔が狭くなり，気圧傾度が大きいため，偏西風の風速が大きくなる。

問 2

(1)　①

解説：
温帯低気圧は，高緯度から流れ込んできた寒気が下降するときに位置エネルギーが変換されることで発達する。

(2)　④

解説：
気圧の尾根の東側では空気が収束して下降気流が発生している。

⑶　①

解説：
空気が発散して上昇気流が発生するところと温帯低気圧の中心が重なると低気圧は発達する。

第 14 講　PART9　確認問題　解答

問 1

(1)　①

解説：
ハドレー循環は赤道付近～亜熱帯の鉛直循環で，亜熱帯の上空の対流圏のほぼ全体で下降気流を生じさせる。

(2)　④

解説：
冬の大陸内部では放射冷却により地表面の温度が極端に下がり，対流圏下層の空気が冷やされて下降気流が生じる。

(3)　③

解説：
ともに地上天気図では確認できるが，対流圏中層～上層の等圧面天気図では背の高い高気圧は確認でき，背の低い高気圧は確認できない。

第15講　PART1　確認問題　解答

問1

（1）①

解説：

風は海面から摩擦力を受け，海面付近の水はその反作用の力を受ける。この反作用の力と転向力がつり合うような流れがエクマン輸送である。

（2）④

解説：

北半球では，海面直下の水は，風の流れの向きに対して45°右向きに流れる。深くなるにつれて流速が小さくなり流れの向きが右向きにずれていき，全体としては直角右向きとなる。エクマン輸送は，低緯度では極向き，中緯度では赤道向きになるので，亜熱帯海域の海面が高くなる。

（3）③

解説：

圧力傾度力と転向力がつり合うような流れを地衡流という。大洋の亜熱帯のまわりの地衡流は北半球では時計回り，南半球では反時計回りに流れ，このような海流の循環を環流という。

問2

（1）②

解説：

大洋の西側で環流が強められることを西岸強化という。

（2）①

解説：

環流は，温かい水を中緯度側へ，冷たい水を低緯度側へと運んでいる。

第 15 講　PART2　確認問題　解答

問 1

(1)　③

解説：
海水 1kg に約 35g の塩分が含まれる。‰（パーミル）は千分率ともいう。

(2)　③

解説：
水温が低いほど，また，塩分が高いほど，海水の密度は大きくなる。

問 2

(1)　①

解説：
グリーンランド沖や南極付近の海で起こった熱塩循環により，深層で世界中をめぐる海水の流れができている。

(2)　④

解説：
深層循環によって，深層の海水は海域によらず比較的均質になっている。

第15講　PART3　確認問題　解答

問1　③

解説：
表面波の速さは深さによらず一定で，長波の速さは波長によらず一定である。

問2　②

解説：
風浪とうねりは表面波として伝わり，津波は長波として伝わる。

第 15 講　PART4　確認問題　解答

問 1

（1）①

解説：
潮汐は 1 日に 1 ～ 2 回ずつの周期でくり返す潮位の変動である。潮位が極大の状態を満潮，潮位が極小の状態を干潮という。

（2）③

解説：
月による起潮力は太陽による起潮力の約 2 倍である。

問 2　①

解説：
大潮は満潮と干潮の潮位差が大きくなった状態で，地球・月・太陽が一直線上にあるときに起こる。

第16講　PART1　確認問題　解答

問1

（1）②

解説：
エルニーニョ現象は赤道太平洋東部において，貿易風や湧昇流が弱まって海水温が高くなる現象である。

（2）③

解説：
南太平洋の東部と西部で海面気圧が，一方が高ければもう一方が低いという状況が交互にくり返す現象を南方振動という。

（3）①

解説：
日本語ではエルニーニョ・南方振動といい，英語の El Niño-Southern Oscillation の頭文字から ENSO ともよばれる。

（4）②

解説：
対流圏で生まれたさまざまなスケールの大気の波動が伝わって形成されるもので，東風と西風が交互に現れる現象である。

(5)　④

解説：
テレ（tele）は「遠くの」を表す接頭語であり，離れた場所の現象が連動するという意味で，テレコネクションとよばれる。

問2

(1)　③

解説：
冬の成層圏の極域で発生する西風は，極のまわりを周回するため極渦という。極渦が対流圏の波動の影響で弱まることにより成層圏の気温が急上昇することがあり，これを成層圏突然昇温という。

(2)　①

解説：
高緯度側の気圧が高めで，中緯度側の気圧が低めのとき，偏西風が弱くなり，蛇行の振幅が大きくなる。

第16講　PART2　確認問題　解答

問1

(1)　③

解説：
酸素分子が紫外線を吸収し，できた酸素原子と別の酸素分子が結合してオゾンとなる。また，塩素分子が紫外線により塩素原子に分解され，それによってオゾンが分解される。

(2)　①

解説：
オゾンは紫外線が酸素分子に作用することによって生成されるので，紫外線量が多い，すなわち日射量の多い低緯度で多く生成される。

(3)　④

解説：
オゾン層に穴が空いているような状態となるためオゾンホールとよばれる。

(4)　①

解説：
塩素分子は冬に極成層圏雲に蓄積され，春に日射が強まる影響で，塩素原子になる。極成層圏雲の発生には低温が維持される必要がある。

(5)　③

解説：
フロンは炭素，塩素，フッ素からなる物質で，このうち塩素がオゾンを分解する。

第 16 講　PART3　確認問題　解答

問 1

(1)　①

解説：
対流圏の中で高度とともに気温が高くなっている部分を逆転層という。地表面から形成される逆転層を特に接地逆転層という。逆転層の内部では大気の安定性が高い。

(2)　②

解説：
都市部の気温が周囲より高くなる現象をヒートアイランド現象という。

(3)　④

解説：
ヒートアイランド現象は，都市部の周囲で放射冷却が特に強く起こりやすい条件でみられやすい。

第16講 PART4　確認問題　解答

問1

(1)　①

解説：
水は温まりにくく冷めにくい（比熱が大きい），状態変化の際に大量の潜熱を発生するという性質をもつ。

(2)　③

解説：
海底に沈殿した有機物や炭酸塩はプレートの沈み込みによって地球内部のマントルへと取り込まれる。人間の活動による石炭などの化石燃料の消費は，炭素を地球表層に戻す作用である。

問2　②

解説：
平均滞留時間は，容量 M のタンク内の物質があり，単位時間あたりの流入量と流出量をともに F とするとき，タンク全体の物質が完全に入れ替わるのに要する時間を表す。

第 17 講　PART1　確認問題　解答

問 1

(1)　③

解説：
リマン海流は寒流であり，黒潮続流は日本の南岸を離れた黒潮の流れを指す。また，宗谷海流はオホーツク海に進んだ対馬海流の延長上の流れである。

(2)　①

解説：
黒潮の方が，流れが速く，塩分がやや高い。

(3)　①

解説：
海流や深層循環は風や塩分，水温の違いが原因となって発生しているが，潮流は起潮力が原因である。

(4)　③

解説：
潮流は海水全体が流れる長波とみなすことができる。

(5)　④

解説：
潮流が強くなるのは幅が狭い海峡部にあたる。具体的には鳴門海峡，来島海峡，関門海峡などが有名である。

(6)　③

解説：
津波の進む速さは，水深が浅くなるほど遅くなり，波高は高くなる。

第 17 講　PART2　確認問題　解答

問 1

(1)　①

解説：
春，秋に偏西風に乗って移動してくる高気圧は移動性高気圧であり，空気が停滞することによって形成される高気圧はブロッキング高気圧という。

(2)　②

解説：
山雪は強い季節風が山脈にぶつかって発生する上昇気流により雲が発達し，山沿いに降雪をもたらす。里雪は上空の寒気のため，季節風が弱くても日本海から沿岸部で雪雲が発達し，大雪となる。

(3)　②

解説：
移動性高気圧と温帯低気圧が交互に通過することで，天気は，3 ～ 5 日程度の周期で変化する。

(4)　③

解説：
激しい雨を降らせる雲は積乱雲であり，このような積乱雲が列をなして連なって大雨を降らせる。

第17講　PART3　確認問題　解答

問1

(1)　②

解説：
日本列島は，糸魚川－静岡構造線によって，東側の東北日本と西側の西南日本に分かれる。

(2)　③

解説：
糸魚川－静岡構造線を西縁とする帯状の部分では，基盤岩が溝のように陥没し，複雑に変形した新生代の地層や火山岩が分布している。

(3)　②

解説：
糸魚川－静岡構造線の西側の西南日本では，基盤岩を構成する付加体や広域変成帯が帯状に分布する。形成年代は大陸側が古く，太平洋側が新しくなっている。

(4)　①

解説：
領家帯と三波川帯は，ともに白亜紀に形成された。

(5)　①

解説：
それぞれの地質帯の境界は断層になっており，特に領家帯の南側の境界を中央構造線という。

第 17 講　PART4　確認問題　解答

問 1

(1)　②

解説：
植物の遺がいが堆積し，化石化したものが石炭である。

(2)　④

解説：
東北日本弧と西南日本弧によって形成されている日本列島の骨格に伊豆・小笠原弧が衝突して現在のような姿となっている。

(3)　①

解説：
第四紀は，寒冷な氷期と温暖な間氷期がくり返す時代だった。

(4)　①

解説：
約 1 万年前に最終氷期が終わり，温暖化した。それにともない，海表面は現在とほぼ同程度まで上昇した。

第 18 講　PART1　確認問題　解答

問 1

(1)　②

解説：
地球の自転を振り子の実験によって証明したのは，フランスのフーコーである。

(2)　②

解説：
振り子の振動面が変化するのは，地球の自転による転向力という見かけの力がはたらいているためである。

(3)　③

解説：
年周視差と年周光行差は，地球が公転していることの証拠である。それぞれ，ベッセルとブラッドレーによって発見された。

(4)　④

解説：
年周視差は，恒星までの距離が大きいほど小さくなる（反比例する）。年周光行差の最大値は，恒星までの距離によらず一定である。

第 18 講　PART2　確認問題　解答

問 1

(1)　②

解説：
惑星は太陽を 1 つの焦点とする楕円軌道を描く。

(2)　③

解説：
ある惑星と太陽を結ぶ線分が単位時間に通過する部分の面積は一定である。面積速度一定の法則とも呼ばれる。

(3)　③

解説：
惑星と太陽の平均距離の 3 乗は，惑星の公転周期の 2 乗に比例する。

第18講　PART3　確認問題　解答

問1

（1）①

解説：
地球の赤道面の延長と天球との交線を天の赤道，地球の自転軸の延長と天球との交点のうち，北極側の交点を天の北極という。

（2）④

解説：
天球上での太陽の通り道を黄道という。

（3）①

解説：
黄道が天の赤道を南側から北側に横切る交点を春分点という。

（4）①

解説：
赤緯の基準は天の赤道であり，赤経の基準は春分点である。春分点は黄道と天の赤道の交点であるから，赤緯は0°である。

第18講　PART4　確認問題　解答

問1

（1）②

解説：
恒星を基準として地球が 1 回自転する時間を 1 恒星日，太陽を基準として地球が 1 回自転する時間を 1 太陽日という。また，恒星を基準として地球が 1 回公転する時間を 1 恒星年，春分点を基準として地球が 1 回公転する時間を 1 太陽年という。

（2）④

解説：
1 恒星日は約 23 時間 56 分，1 太陽日は 24 時間である。

（3）③

解説：
地球の自転軸は，公転面に垂直な方向に対して約 23° 傾いたまま回転している。これを歳差運動という。

問2

（1）①

解説：
天の赤道上を一定の速さで移動する仮想的な太陽を平均太陽といい，これをもとに定めた時刻を平均太陽時という。また実際の太陽の動きに基づく時刻を視太陽時という。

（2）③

解説：
平均太陽時と視太陽時の時間差を均時差という。

問3　①

解説：

太陰暦は, 月の満ち欠けを基準として1か月を定める暦で, 太陰太陽暦は，太陰暦にうるう月を挿入して日付と季節の対応関係を改善させた暦である。太陽暦は太陽の見え方をもとにしていて，1 太陽年と 365 日とのずれをうるう年によって調整している。

第18講　PART5　確認問題　解答

問1

(1)　②

解説：
内惑星が地球と太陽を結ぶ直線上にあるとき，地球と太陽の間にあるときを内合，太陽の向こう側にあるときを外合という。

(2)　③

解説：
外惑星が地球と太陽を結ぶ直線上にあるとき，地球側にあるときを衝，太陽の向こう側にあるときを合という。

問2

(1)　②

解説：
惑星が天球上を西から東へ動くことを順行，東から西へ動くことを逆行という。

(2)　②

解説：
内惑星では内合の前後，外惑星では衝の前後で逆行が起こる。

第19講　PART1　確認問題　解答

問1

（1）①

解説：

太陽の半径は約7.0×10^5 kmで，地球の約110倍である。

（2）②

解説：

太陽の質量は約2.0×10^{30} kgで，地球の約33万倍である。

問2

（1）④

解説：

太陽の中心核の高温条件では，水素の核融合が起こり，4つの水素原子核が1つのヘリウム原子核に変化する。

（2）①

解説：

太陽の中心核では，水素の核融合が起こり，そのエネルギーは，はじめはおもに放射，その後はおもに対流により表面へと伝わる。

第 19 講　PART2　確認問題　解答

問 1　④

解説：
黒点は周囲より 1500 ~ 2000 K 程度低温で，放射する電磁波のエネルギーが小さいため暗く見える。一方、白斑は周囲より 100 ~ 200 K 程度高温で明るく見える。粒状斑は光球全体に見られ，細かい対流のようすを上から見たものである。

問 2

(1)　①

解説：
光球のすぐ外側の大気層を彩層といい，その外側の大気層をコロナという。コロナの温度は 100 万 K を超える。

(2)　④

解説：
彩層に見られる炎のような構造をプロミネンスという。

第19講　PART3　確認問題　解答

問1　④

解説：
太陽の黒点数は約 11 年周期で増減をくり返しており，黒点数が多い時期ほど太陽活動が活発であるといえる。

問2

(1)　③

解説：
太陽大気が爆発的に輝く現象をフレアといい，おもに黒点付近の上空で見られる。

(2)　①

解説：
フレアによって強い電磁波が放出されると，地球の電離圏に影響を与え，通信障害などが起こる。これをデリンジャー現象という。

(3)　②

解説：
コロナ中のプラズマが，突発的に宇宙空間へと放出される現象をコロナ質量放出という。

(4)　④

解説：
コロナ質量放出によって密度の大きな太陽風が地球に到達すると，地球磁気圏の突発的な変化を引き起こすことがある。これを磁気嵐という。

第19講　PART4　確認問題　解答

問1　③

解説：
木星，土星，天王星，海王星を木星型惑星といい，さらに巨大ガス惑星の木星・土星，巨大氷惑星の天王星・海王星に分類される。

問2

(1)　②

解説：
木星は太陽系最大の惑星で，平均密度や化学組成は太陽に近い。

(2)　②

解説：
金星は固体部分の大きさ，内部構造，化学組成は地球とよく似ており，公転と逆向きに自転している。

(3)　②

解説：
火星の極には水と二酸化炭素の氷からなる極冠が形成され，季節により消長をくり返している。

(4)　③

解説：
土星は太陽系で２番目に大きい惑星で，微細な氷からなる環（リング）をもつ。

第19講　PART5　確認問題　解答

問1　①

解説：
太陽系の惑星のうち，水星と金星以外は衛星をもっている。とくに木星型惑星には衛星が多数ある。

問2

(1)　③

解説：
彗星の中心核は岩石，塵，氷などの集合体で，直径は数 km 程度である。周期が 200 年以上のものは長周期彗星と呼ばれる。

(2)　④

解説：
小惑星の多くは，火星軌道と木星軌道の間の小惑星帯（メインベルト）に存在する。

(3)　②

解説：
冥王星は，かつては惑星であったが，惑星の定義の見直しにより，エリスなどとともに太陽系外縁天体に分類されるようになった。

問3

（1） ④

解説：

流星のもととなる数十μmから1m程度の小天体を流星物質という。

（2） ②

解説：

飛来した小天体のうち，地表へと達したものを隕石という。隕石は，その成分により，石質隕石，鉄隕石，石鉄隕石に分類される。

第 20 講　PART1　確認問題　解答

問 1

(1)　③

解説：

見かけの等級は，天体が明るいほど値が小さくなり，天体の明るさが 100 倍異なると，5 等級異なる。

(2)　①

解説：

太陽の見かけの等級は，約－27 等級である。

(3)　②

解説：

天体の年周視差が 1″となる距離を 1 パーセクとし，1 パーセクは約 3.26 光年である。

(4)　②

解説：

$m - M = -5 \log_{10} \frac{d}{10}$ である。$d = 10$〔パーセク〕のとき $M = m$ となり，絶対等級 M が同じであれば，距離 d が 10 倍になるごとに見かけの等級 m は 5 ずつ大きく（つまり暗く）なる。

第 20 講　PART2　確認問題　解答

問 1

⑴　②

解説：
電磁波の強度を波長ごとに分けたものがスペクトルである。波長に対して強度が連続的に変化するものを連続スペクトル，特定の波長のみに見られるものを線スペクトルという。

⑵　④

解説：
暗線の波長は恒星の大気中に含まれる元素によって決まり，元素によって吸収を起こしやすい温度が異なるため，暗線の組合せは恒星の表面温度で決まる。

問 2

⑴　①

解説：
暗線の組合せをもとにしてスペクトルを分類したものをスペクトル型という。

⑵　①

解説：
恒星のスペクトル型 は O, B, A, F, G, K, M の順に暗線が多くなり，O 型は表面温度が高く青っぽく，M 型は表面温度が低く赤っぽい。

第 20 講　PART3　確認問題　解答

問 1

(1)　②

解説：
このような図を HR 図（ヘルツシュプルング･ラッセル図）という。

(2)　④

解説：
超巨星は HR 図の最上部に分布し，非常に明るい。赤色巨星は HR 図の右上に分布し，低温で明るい。白色矮星は HR 図の左下に分布し，高温で暗い。

(3)　④

解説：
主系列星は HR 図の左上から右下にかけて帯状に分布する。左上にある恒星はスペクトル型が O や B で，高温で明るい。

第 20 講　PART4　確認問題　解答

問 1

（1）④

解説：

質量が 10 のときの縦軸の値を読みとると，10^4 なので，10000 倍となる。

（2）②

解説：

恒星の主系列星としての寿命を核融合で使用する水素がなくなるまでの時間と考えると，質量が大きいほど寿命は短い。

第 20 講　PART5　確認問題　解答

問 1

(1)　①

解説：
星間ガスはおもに水素とヘリウムからなる。

(2)　③

解説：
星間物質は，通常 1 個 /cm^3 未満の低密度である。星間物質が周囲より密 (数個 /cm^3 ～ 10^2 個 /cm^3 程度) になった領域を星間雲という。

(3)　④

解説：
原始星が形成された時点では周囲の分子雲の密度が大きく，可視光線で観測することはできない。原始星の周囲の星間物質が減少すると，中心の恒星を可視光線で観測できるようになる。この段階を T タウリ型星という。

(4)　①

解説：
T タウリ型星への星間物質の集積や重力による収縮が進むと，中心部の温度が 1000 万 K を超え，水素の核融合が始まる。この状態の恒星を主系列星という。現在の太陽は主系列星である。

⑸　④

解説：

赤色巨星の中心核の温度が約 1 億 K を超えると，ヘリウムの核融合が始まり，炭素や酸素が生成される。

⑹　②

解説：

太陽程度の質量をもつ恒星は，

原始星→ T タウリ型星→主系列星→赤色巨星→白色矮星の順に進化する。

第 20 講　PART6　確認問題　解答

問 1

(1)　②

解説：
太陽の８倍程度より重い恒星は，進化の末期に超新星爆発を起こす。

(2)　③

解説：
大質量星は赤色巨星となり，自らの重力でつぶれて大爆発を起こす。

(3)　③

解説：
大質量星が超新星爆発を起こした後に中心部に残された高密度の天体のうち，中性子を主成分とする天体を中性子星といい，さらに高密度で光さえも脱出できない天体をブラックホールという。

第 20 講　PART7　確認問題　解答

問 1

(1)　③

解説：
100 ～ 1000 個の恒星が不規則に集まり，まばらに見える星団を散開星団，数十万～数百万個の恒星が密集して，まるく見える星団を球状星団という。

(2)　①

解説：
種族Ⅰの恒星は He より重い元素の割合が大きく，年齢が若い。散開星団に属する恒星は種族Ⅰに分類される。種族Ⅱの恒星は He より重い元素の割合が小さく，年老いた恒星である。球状星団に属する恒星は種族Ⅱに分類される。

第 20 講　PART8　確認問題　解答

問 1

(1)　④

解説：
連星をなす 2 つの恒星のうち，明るい方を主星，暗い方を伴星という。

(2)　①

解説：
（質量）×（共通重心からの距離）が等しくなる。

問 2　②

解説：
連星の公転面が視線方向と垂直でないとき，視線速度の周期的な変化により恒星からの線スペクトルの波長が変化して見える。このことから推定される連星を分光連星という。
連星の公転面が視線方向と平行なとき，2 つの恒星の一方が他方の前を横切って見え，連星全体の明るさが小さくなる。このように明るさが周期的に変化することから推定される連星を食連星という。

第 21 講　PART1　確認問題　解答

問 1

⑴　④

解説：

銀河系は，約 2000 億個の恒星の集団である。

⑵　④

解説：

銀河系の中心には楕円体状のバルジがあり，その周囲には半径約 5 万光年の円盤部（ディスク）と，半径約 7 万 5000 光年の球状の領域であるハローが広がっている。

⑶　②

解説：

銀河系のバルジの中心には超大質量ブラックホールがあり，そのまわりには古い恒星が分布する。

⑷　③

解説：

ハローには古い恒星や，球状星団が分布している。

第 21 講　PART2　確認問題　解答

問 1

(1)　③

解説：
銀河回転は，銀河系の円盤部に多く分布する種族Ⅰの恒星が銀河中心を通る軸のまわりを公転する現象である。

(2)　④

解説：
銀河の回転曲線から，銀河系の質量が推定されている。

(3)　②

解説：
銀河回転の速さは，半径 5 万光年である円盤部より外側でもなだらかに保たれている。そのため，電磁波では発見されていない未知の物質があるものと考えられている。

(4)　②

解説：
バルジでは個々の天体が乱雑に運動している。ハローでは，種族Ⅱの恒星や球状星団が銀河面に斜交する軌道を描いて運動している。

第 21 講　PART3　確認問題　解答

問 1

(1)　②

解説：
ハッブル分類は，銀河の形態に着目した分類である。楕円銀河，渦巻き銀河，棒渦巻き銀河などがある。

(2)　③

解説：
銀河系は，ハッブル分類では，棒渦巻き銀河に分類される。

問 2　④

解説：
銀河の中心部の限られた領域から非常に強い電磁波を放射している銀河を活動銀河といい，クェーサー，セイファート銀河，電波銀河などがある。

第 21 講　PART4　確認問題　解答

問 1

⑴　③

解説：
年周視差の大きさは距離に反比例するため，近傍の星に対してはこの方法が使われる。

⑵　④

解説：
赤色巨星がヘリウムの核融合を起こすと，大気が不安定になって膨張と収縮をくり返すことがあり，それに伴って光度を変化させる。このような恒星を脈動変光星という。

⑶　①

解説：
周期光度関係は，脈動変光星の変光周期と絶対等級の間の関係である。変光周期から絶対等級を推定し，見かけの等級と組み合わせると距離を求めることができる。

⑷　③

解説：
白色矮星と赤色巨星が近距離で連星になっているとき，赤色巨星から白色矮星へ物質が流れて，白色矮星の質量が大きくなると不安定となって爆発する。この爆発による超新星をⅠa 型超新星という。

第 21 講　PART5　確認問題　解答

問 1

(1)　④

解説：
多数の銀河が互いの重力によってまとまり，銀河群や銀河団などの集団を形成している。

(2)　①

解説：
銀河の数がおよそ 100 個より少ない集団を銀河群，100 個より多い集団を銀河団という。

(3)　①

解説：
銀河系を含む銀河群を局部銀河群といい，おとめ座銀河団などとともにおとめ座超銀河団を形成している。

(4)　②

解説：
超銀河団は宇宙空間内で泡の表面のように連なって分布している。泡の内側は銀河がほとんど分布しない空洞になっていて，ボイドといわれる。

第 21 講　PART6　確認問題　解答

問 1

(1)　②

解説：

観測される銀河のスペクトル中の線スペクトルの波長が本来より長い方にずれて見えることを赤方偏移という。赤方偏移 z は，銀河のスペクトルについて静止時の波長を λ_0，観測される波長を $\lambda_0 + \Delta\lambda$ とすると，$z = \dfrac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$ と表される。また，$|z|$ が 1 より十分に小さいとき，銀河の後退速度 v と光速度 c を用いて，$z = \dfrac{v}{c}$ と表される。

(2)　③

解説：

ハッブル・ルメートルの法則は，銀河の後退速度を v，銀までの距離を r とすると，ハッブル定数 H_0 を用いて，$v = H_0 r$ と表される。

(3)　②

解説：

宇宙が 1 点に集まっていた時刻から現在までの時間をハッブル時間といい，宇宙の年齢の目安となる。

第 21 講　PART7　確認問題　解答

問 1

(1)　③

解説：
宇宙の誕生は今から 138 億年前である。

(2)　②

解説：
ビッグバンから 38 万年後，それまで自由に飛び回っていた電子が原子核のまわりを回るようになり，光が直進できるようになった。これを宇宙の晴れ上がりという。

(3)　①

解説：
3 K 宇宙背景放射は，宇宙のあらゆる方向から同じ強さで観測される。これを 3 K 宇宙背景放射の等方性という。

(4)　③

解説：
3 K 宇宙背景放射の詳細な観測により，宇宙には，通常の物質が 5%，ダークマターが 27%，ダークエネルギーが 68% あることがわかっている。

第 22 講　PART1　確認問題　解答

問 1

(1)　③

解説：

$$\log_{10}100000 = \log_{10}10^5 = 5$$

(2)　①

解説：

$$\log_{10}20 + \log_{10}50 = \log_{10}(20 \times 50)$$
$$= \log_{10}1000$$
$$= \log_{10}10^3 = 3$$

(3)　④

解説：

底の変換より，

$$\log_2 10 = \frac{\log_{10} 10}{\log_{10} 2} = \frac{1}{\log_{10} 2}$$

問 2

(1)　②

解説：

$M = m + 5 - 5\log_{10} d$ に $m = 1.5$，$d = 30$ を代入すると，

$$M = 1.5 + 5 - 5\log_{10} 30$$
$$= 1.5 + 5 - 5 \times (\log_{10} 3 + \log_{10} 10)$$
$$= 6.5 - 5 \times (0.48 + 1) = -0.9$$

(2)　③

解説：

$M = m + 5 - 5\log_{10}d$ に $M = -3.0$，$m = 2.0$ を代入すると，

$$-3.0 = 2.0 + 5 - 5\log_{10}d$$
$$5\log_{10}d = 10$$
$$\log_{10}d = 2$$
$$d = 10^2 = 100$$

第 22 講 PART2　確認問題　解答

問 1

(1)　③

解説：
単振動の式は $x = A\sin\omega t$ で表され，A を振幅，ω を角振動数という。

(2)　①

解説：
質量 m の物体が復元力 $-kx$ を受けて運動するとき，物体は単振動をし，周期 T は $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ と表される。

(3)　④

解説：
長さ l の単振り子の周期は，振れが小さいとき $2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ と表すことができ，おもりの質量や振り子の振幅によらない。

第 22 講　PART3　確認問題　解答

問 1

（1）①

解説：
原子は，正の電荷をもつ陽子と負の電荷をもつ電子の数が等しく，電気的に中性である。電子を失って正の電荷をもつものを陽イオンといい，電子を得て負の電荷をもつものを陰イオンという。

（2）③

解説：
1 つの陽イオンができるだけ多くの陰イオンと接触し，陽イオンどうし，陰イオンどうしは接触しない状態が安定である。

（3）②

解説：
イオン結晶では，陽イオンと陰イオンの半径の比によって，安定な結晶構造が異なる。

第 22 講　PART4　確認問題　解答

問 1

(1)　④

解説：
地形図の等高線は標高を表している。

(2)　③

解説：
国土地理院発行の縮尺 2 万 5 千分の 1 の地形図では，10 m ごとに等高線が引かれており，これを主曲線という。また，50 m ごとの太い等高線は計曲線という。

(3)　②

解説：
10 cm × 25000 = 250000 cm = 2500 m = 2.5 km

問 2

(1)　①

解説：
海岸線は標高 0 m の等高線とみなせ，海側に凸になっている部分は半島，陸側に凸になっている部分は湾に対応する。

(2)　③

解説：
陸地において周囲より標高の高い部分の連なりを尾根という。地形図では，等高線が標高の低い側に凸になっている部分に対応する。

Ⓒ RECRUIT
本サービスに関する知的財産権その他一切の権利は著作権者に帰属します。
また本サービスに掲載の全部または一部につき無断複製・転載を禁止します。